



UNIVERSIDADE DO MINDELO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA E RECURSOS DO MAR

CURSO DE LICENCIATURA em **ENGENHARIA EM ENERGIAS RENOVÁVEIS**

RELATÓRIO DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO
ANO LETIVO 2016/2017 – 4º ANO

Tema: Projeto de um Conversor cc-cc de Duplo Ganho Estático
Aplicado a Sistemas de Energias Renováveis

Autor: João Evangelista Monteiro Alves, N.º 3140

Orientador: Pós Grad. Aldino Santos da Cruz

Coordenação: João Dias, Ph.D

Mindelo, 2017

CURSO DE LICENCIATURA EM ENGENHARIA EM ENERGIAS RENOVÁVEIS

RELATÓRIO DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

ANO LETIVO 2016/2017 – 4º ANO

PROJETO DE UM CONVERSOR CC-CC DE DUPLO GANHO ESTÁTICO APLICADO A SISTEMAS DE ENERGIAS RENOVÁVEIS

AUTOR: JOÃO EVANGELISTA MONTEIRO ALVES, N.º 3140

ORIENTADOR: PÓS GRAD. ALDINO SANTOS DA CRUZ

Coordenação: João Dias, Ph.D

Mindelo, 2017

João Evangelista Monteiro Alves

**PROJETO DE UM CONVERSOR CC-CC DE DUPLO
GANHO ESTÁTICO APLICADO A SISTEMAS DE
ENERGIAS RENOVÁVEIS**

Projeto do trabalho de conclusão do curso,
apresentado à Universidade do Mindelo como parte
dos requisitos para obtenção do grau de licenciatura
em Engenharia em Energias renováveis.

Orientador:

Pós Grad. Aldino Santos da Cruz

Mindelo, 2017

RESUMO

Neste trabalho apresenta-se o estudo, desenvolvimento e projeto de um conversor contínuo para contínuo de duplo ganho estático, com uma topologia inovadora a partir do clássico conversor *CUK*. O projeto visa o condicionamento do sinal elétrico de fontes de corrente contínua proveniente de energias renováveis para um próximo estágio, por exemplo um inversor, que por seu turno alimentará uma carga CA (corrente alternada) para sistemas autônomos, podendo também injetar energia à rede elétrica.

Trata-se de um *boost-boost* não isolado, sempre elevador cuja tensão mínima de carga é o dobro da tensão de entrada, tendo como principais vantagens: fonte de corrente à entrada e à saída, reduzida ondulação na carga e elevado rendimento utilizando um único comutador de potência. Estas características foram obtidas no estudo teórico e confirmadas através dos resultados conseguidos durante a simulação computacional ao longo do trabalho.

Palavras-chave: ganho estático, micro geração, multiplicadores de tensão, conversor *Cuk*.

ABSTRACT

This work presents the study, development and design of a continuous converter for continuous dual-gain static, with an innovative topology from the classic CUK converter. The project aims at conditioning the electrical signal from direct current sources from renewable energies to an upcoming stage, for example an inverter, which in turn will feed an AC load to autonomous systems, and can also inject energy into the electrical grid .

This is a non-isolated boost-boost, always an elevator whose minimum load voltage is double the input voltage, having as main advantages: current source at the input and output, reduced load ripple and high efficiency using a single power switch. These characteristics were obtained in the theoretical study and confirmed through the results obtained during the computational simulation throughout the work.

Key words: static gain, micro generation, voltage multipliers, Cuk converter.

Dedico este trabalho à minha família, que sempre me incentivou para a realização dos meus projetos de vida.

À memória do meu amigo e colega Samuel Delgado.

Agradecimentos

À minha família pelo carinho, compreensão e incentivo para que pudesse chegar até aqui.

Aos colegas do curso expresso a minha gratidão pelos bons momentos de convivência e também por me tolerarem durante as discussões travadas nas apresentações dos trabalhos.

Agradeço aos professores da Universidade do Mindelo pelos ensinamentos e pela paciência durante o curso.

Ao meu orientador e professor Aldino Cruz pelo encorajamento e por todo o conhecimento partilhado durante a realização deste trabalho.

Ao coordenador do curso João Dias que incansavelmente trabalhou para desenvolver o curso e me apoiou e motivou na realização deste trabalho.

À Universidade do Mindelo pela ousadia da implementação do curso de Engenharia em Energias Renováveis em Cabo Verde.

Agradeço ainda a todas as pessoas que, de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

“Um grande homem é aquele que recolhe o conhecimento da forma como uma abelha coleta mel e a usa para ajudar as pessoas a superar as dificuldades que sofrem – fome, ignorância e doença!”

Nicola Tesla

ÍNDICE PRINCIPAL

1. INTRODUÇÃO	16
1.1. Objetivos	18
1.1.1. Objetivo Geral	18
1.1.2. Objetivos Específicos	18
1.2. Contribuições Esperadas do Projeto	19
1.3. Metodologia	19
1.4. Estrutura do Trabalho	20
2. ESTADO DA ARTE.....	21
2.1. Fundamentos Teóricos dos Conversores CC-CC não Isolados	21
2.2. Conversor <i>Buck</i>	25
2.3. Conversor <i>Boost</i>	27
2.4. Conversor <i>Buck-Boost</i>	29
2.5. Conversor <i>Cuk</i> e a sua topologia clássica.....	32
2.5.1. Funcionamento do conversor <i>Cuk</i>	32
2.5.2. Comportamento da tensão e corrente nos componentes do conversor <i>Cuk</i> ...	34
2.5.3. Ganho Estático (G) do conversor <i>Cuk</i>	36
2.5.4. Ondulação da corrente I_{L1} , I_{L2} e da tensão V_{C1} ,.....	39
3. CONVERSOR CC-CC DE DUPLO GANHO ESTÁTICO	42
3.1. 1ª Etapa de Operação do Conversor cc-cc de Duplo Ganho Estático.....	43
3.1.1. Corrente elétrica nos componentes do circuito eletrónico.....	44
3.1.2. Tensão elétrica nos componentes do circuito eletrónico	44
3.2. 2ª Etapa de Operação do Conversor cc-cc de Duplo Ganho Estático.....	45
3.2.1. Corrente elétrica nos componentes do circuito eletrónico.....	46
3.2.2. Tensão elétrica nos componentes do circuito elétrico	46
3.3. Ganho Estático do Conversor cc-cc de Duplo Ganho Estático.....	47
3.4. Ondulação nos componentes do conversor cc-cc proposto	51
3.4.1. Ondulação da corrente elétrica na bobina L_1	51
3.4.2. Ondulação da corrente elétrica na bobina L_2	52
3.4.3. Ondulação de tensão elétrica no condensador C_1	53
3.4.4. Ondulação de tensão elétrica nos condensadores C_2 , C_3 e C_4	53
3.4.5. Ondulação de tensão elétrica no condensador C_O	54

3.5.	Corrente elétrica nos semicondutores de potência.....	54
3.5.1.	Corrente elétrica média no comutador Q_1	54
3.5.2.	Corrente elétrica eficaz no comutador Q_1	56
3.5.3.	Corrente média e de pico nos díodos de comutação rápida.....	57
3.5.4.	Corrente de pico nos díodos de comutação rápida	58
4.	PROJETO DO CONVERSOR CC-CC DE DUPLO GANHO ESTÁTICO	60
4.1.	Parâmetros para projeto dos componentes.....	60
5.	SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL	64
6.	ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	71
7.	CONCLUSÃO	73
8.	TRABALHOS FUTUROS.....	74
9.	REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA	75

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1	22
Figura 2.2	24
Figura 2.3	25
Figura 2.4	27
Figura 2.5	30
Figura 2.6	32
Figura 2.7	33
Figura 2.8	34
Figura 3.1	43
Figura 3.2	43
Figura 3.3	45
Figura 5.1	64

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 2.1	22
Gráfico 2.2	23
Gráfico 2.3	24
Gráfico 2.4	25
Gráfico 2.5	26
Gráfico 2.6	27
Gráfico 2.7	28
Gráfico 2.8	29
Gráfico 2.9	29
Gráfico 2.10	30
Gráfico 2.11	31
Gráfico 2.12	31
Gráfico 2.13	33
Gráfico 2.14	36
Gráfico 2.15	37
Gráfico 2.16	37
Gráfico 2.17	38
Gráfico 2.18	39
Gráfico 2.19	40
Gráfico 2.20	41
Gráfico 3.1	47
Gráfico 3.2	48
Gráfico 3.3	51
Gráfico 3.4	52
Gráfico 5.1	65
Gráfico 5.2	65
Gráfico 5.3	66
Gráfico 5.4	66
Gráfico 5.5	67
Gráfico 5.6	67
Gráfico 5.7	68
Gráfico 5.8	68
Gráfico 5.9	69
Gráfico 5.10	69
Gráfico 5.11	70
Gráfico 5.12	70

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1	50
Tabela 2	60
Tabela 3	72

ÍNDICE DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

Símbolo	Descrição
Δ	Variação (ondulação)
C	Condensador
C_1	Condensador de transferência de energia
C_2	Condensador de elevação
C_3	Condensador de elevação de tensão
CA	Corrente alternada
C_o	Condensador de saída
D	Díodo de comutação rápida
Dm	Díodo de comutação rápida
D	Razão cíclica ou ciclo de trabalho
D_1	Díodo de comutação rápida
D_2	Díodo de comutação rápida
D_3	Díodo de comutação rápida
f	Frequência de comutação
G	Ganho estático
$i_D(t)$	Corrente instantânea nos díodos
i_{Dpk}	Corrente média
i_{ef}	Corrente eficaz
$i_{L1}(t)$	Corrente instantânea na bobina de entrada
$i_{L2}(t)$	Corrente instantânea na bobina de saída
CC	Corrente contínua
Vcc	Tensão de corrente contínua
L_1	Bobina de entrada
L_2	Bobina de saída
L_x	Bobina de amortização
M	Malha

MOSFET	Transístor de efeito de campo
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i> (Modulação por largura de pulso)
Q_1	Comutador semiconductor
R_o	<i>Resistor output</i> (saída ou carga)
T	Período de comutação
TBJ	Transístor bipolar de junção
IGBT	Transístor bipolar de porta isolada
PSIM	<i>Powersimu ln</i>
T_{off}	Tempo de fecho
T_{on}	Tempo de abertura
UM	Universidade do Mindelo
V_o	Tensão de saída “ <i>output</i> ”
V_s	Fonte de tensão contínua

1. INTRODUÇÃO

A população de Cabo Verde cresce e a procura de energia elétrica também cresce para atender às suas necessidades energéticas. Segundo o Plano Nacional de Ação para Eficiência Energética para Cabo Verde (Verde, 2015), em 2010 a população era de 491.683 habitantes, com 61,8% a viver em região urbana, totalizando 124.911 famílias. Entre 2010 e 2013, a população cresceu a uma taxa média anual de 1,2%, atingindo 512.173 habitantes em 2013. Em termos do consumo de eletricidade, este aumentou de 269,9 GWh em 2010 para 307 GWh em 2013.

Em Cabo Verde a produção de energia elétrica está ancorada em derivados de petróleo, aumentando a importação e a emissão de gases de efeito estufa contribuindo, desde modo, para o aquecimento global. Para diminuir a importação e o impacto ambiental dos derivados de petróleo na produção de energia elétrica, a aposta é fazer uso das fontes de energias renováveis, o sol e o vento que exuberam em Cabo Verde.

O processamento feito pelos conversores CC-CC (contínuo para contínuo) é muito importante, pois é nesse momento que se aperfeiçoa a retirada da máxima potência possível dos dispositivos constituintes dos sistemas de energias renováveis, através de um controle chamado MPPT (*Maximum Power Point Tracking*), com a vantagem de se utilizar os sistemas nos grandes centros urbanos, rurais e em zonas remotas.

O trabalho propõe um Projeto de um Conversor cc-cc de Duplo Ganho Estático aplicado a Sistemas de Energias Renováveis.

Esta proposta partiu da nossa vontade em estudar e desenvolver uma nova topologia para um protótipo didático de um conversor cc-cc, de modo a auxiliar as aulas práticas da Universidade do Mindelo (UM), para que os estudantes de engenharia possam aplicar os conhecimentos adquiridos ao longo do curso, principalmente nas Eletrónicas I, II e Automação e Controlo. Favorece também os sistemas de geração de energia a partir de fontes renováveis, com alto ganho de tensão de entrada e saída em fonte de corrente, ideal para estágios que necessitam de uma corrente constante na sua entrada (controlador de carga de baterias e inversores), menor esforço elétrico nos seus componentes e menor custo, por se tratar de um sistema modular. Ainda promove a investigação no processo de geração e

condicionamento de energia elétrica a partir de fontes renováveis de energia.

O projeto proposto limita-se ao estudo, desenvolvimento e simulação computacional do circuito eletrônico de potência de uma nova topologia de Conversor cc-cc (*Boost-Boost*) a partir da topologia clássica do conversor *CUK*. Com a hipótese de dobrar a tensão de entrada, diminuir a ondulação de saída e aumentar a eficiência da conversão energética.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo Geral

Desenvolvimento de uma nova topologia de Conversor contínuo para contínuo *Boost-Boost*, aplicado aos sistemas de produção de energia {fotovoltaico, eólico, célula de combustível ou bateria}.

1.1.2. Objetivos Específicos

- Revisar a literatura;
- Estudar o conversor *Boost-Boost*;
- Dimensionar os componentes do circuito eletrónico do conversor *Boost-Boost*;
- Simular o conversor *Boost-Boost* no *PSIM (Powersimu ln)*;
- Analisar os resultados obtidos.

1.2. Contribuições Esperadas do Projeto

Com este projeto pretende-se dar uma pequena contribuição para a investigação científica em Cabo Verde, no domínio da eletrónica de potência aplicada à geração de energia elétrica a partir de fontes renováveis de energia no que toca ao condicionamento do sinal elétrico.

1.3. Metodologia

O presente estudo integra-se no âmbito da investigação-ação, na medida em que este tipo de metodologia de investigação tem como objetivo trabalhar uma situação concreta, com vista a introduzir mudanças. Segundo (Carmo & Ferreira, 1998), “o propósito desta investigação é resolver problemas de carácter prático, através do emprego do método científico. A investigação é levada a cabo a partir da consideração da situação real” resultante da interação dinâmica entre a ação e a investigação, entre a teoria e a prática.

A proposta do trabalho será constituída de pesquisa bibliográfica, dimensionamento e simulação computacional do circuito eletrónico de potência de uma nova topologia de um conversor cc-cc de elevado ganho estático, tendo como foco a aplicação do conhecimento científico.

Começou-se por dimensionar os componentes ativos e passivos do circuito eletrónico da topologia com base na teoria de eletrónica de potência. E por fim, no ambiente computacional realizou-se simulações para verificar os parâmetros obtidos no dimensionamento da topologia, através do simulador *PSIM (Powersimu ln)*, para as conclusões finais.

1.4. Estrutura do Trabalho

O trabalho encontra-se dividido em seis capítulos. No primeiro capítulo, fez-se o enquadramento do trabalho. No segundo, elaborou-se uma breve revisão bibliográfica dos quatro primeiros conversores clássicos contínuo para contínuo, considerando o modo de condução contínua. No terceiro capítulo, estudou-se o conversor contínuo para contínuo de duplo ganho estático, acompanhado da análise matemática do circuito eletrónico de potência. No quarto, projetou-se o conversor proposto dimensionando os seus parâmetros e componentes a partir de especificações pré-estabelecidas. No quinto capítulo fez-se a simulação computacional do conversor proposto, no sentido de verificar a sua funcionalidade e finalizou-se com a conclusão geral do trabalho.

2. ESTADO DA ARTE

Neste capítulo aborda-se os principais fundamentos teóricos das topologias dos conversores de comutação forçada contínuo para contínuo, não isolados, em modo de condução contínua (MCC), muito citado pela literatura. Rashid (2001) considera quatro tipos de conversores básicos, quais são:

- Conversor abaixador de tensão (“step-down” ou “Buck”);
- Conversor elevador de tensão (“step-up” ou “Boost”);
- Conversor à acumulação indutiva (“step down/up” ou “Buck-boost”);
- Conversor à acumulação capacitiva (“Cuk” ou “Boost-buck”).

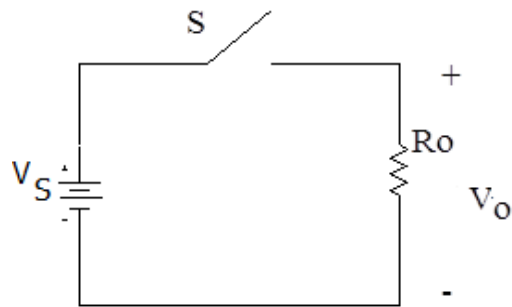
Para a revisão bibliográfica, fez-se uma abordagem mais alargada da topologia clássica do conversor *CUK*, tendo em conta que o projeto proposto baseia-se nesta topologia.

2.1. Fundamentos Teóricos dos Conversores CC-CC não Isolados

Segundo Labrique & Santana, (s.d.) os conversores de comutação forçada CC-CC não isolados são sistemas formados por semicondutores de potência (TBJ, IGBT e MOSFET) operando como interruptores, e por elementos passivos (bobinas e condensadores) que controlam o trânsito de potência do gerador para o recetor sem qualquer isolamento entre a entrada e a saída.

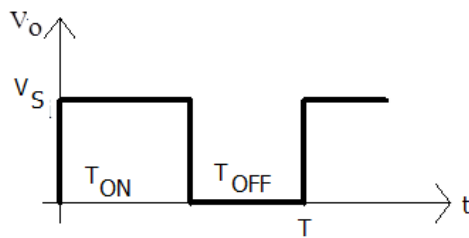
A figura 2.1 mostra o diagrama elétrico e o gráfico 2.1 a forma de onda da tensão de saída de um conversor CC-CC básico. (Barbi, s.d.):

Figura 2.1
Conversor cc-cc Básico.



Fonte: Adaptado de Martins e Barbi. 2006

Gráfico 2.1
Forma de onda da tensão de saída do conversor cc-cc Básico



Fonte: Adaptado de Martins e Barbi. 2006

O intervalo de comutação é definido como:

$$T = \frac{1}{f} \quad (1)$$

T é o intervalo de comutação do interruptor S

T_{ON} é intervalo de condução do interruptor S

T_{OFF} é o intervalo de não condução do interruptor S

f é a frequência de comutação do interruptor S

D razão cíclica, é a relação entre o intervalo de condução e o intervalo de comutação do interruptor S, calculada pela equação 2:

$$D = \frac{T_{ON}}{T} \quad (2)$$

A tensão média na saída deste conversor cc-cc calcula-se por:

$$V_o = \frac{1}{T} \int_0^{T_{on}} V_s dt = V_s \frac{T_{on}}{T} \quad (3)$$

Fazendo $T_{on} = DT$ e substituindo na equação 3, tem-se:

$$V_o = DV_s \quad (4)$$

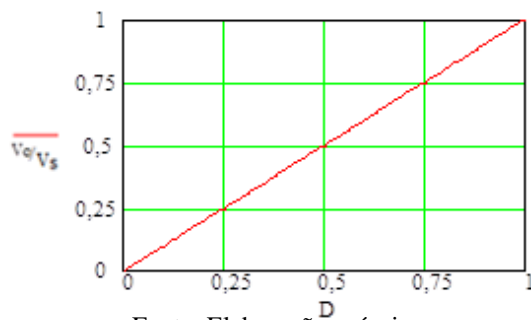
Isolando D na equação 4, tem-se:

$$D = \frac{V_o}{V_s} \quad (5)$$

A equação 5 expressa o ganho estático do conversor cc-cc que é a relação entre a tensão de saída e a tensão de entrada. O gráfico 2.2 mostra que a variação da tensão de saída com a razão cíclica é linear.

Gráfico 2.2

Ganho estático em função da razão cíclica.

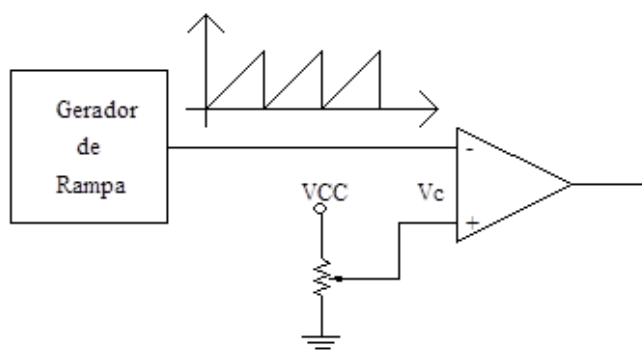


Fonte: Elaboração própria

Os sinais de controlo que forçam a comutação do interruptor S nos conversores cc-cc podem ser gerados com frequência fixa ou variável. Uma forma de gerar os sinais de controlo com frequência fixa é através de modulação por largura de pulso (PWM).

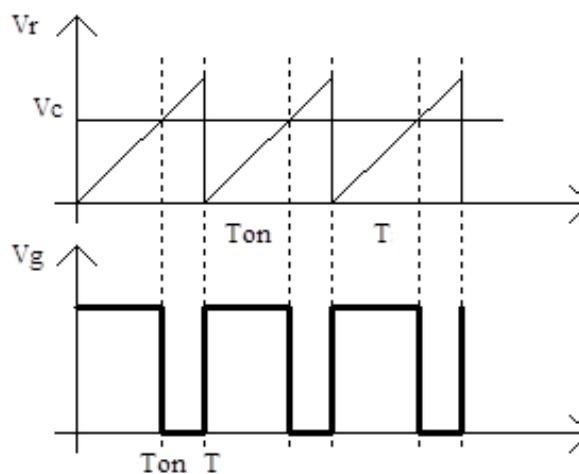
A figura 2.2 mostra um circuito que realiza de forma simples o controlo PWM e o gráfico 2.3 a evolução no tempo da sua forma de onda:

Figura 2.2
Circuito gerador de PWM



Fonte: Adaptado de Martins e Barbi. 2006

Gráfico 2.3
Evolução da forma de onda PWM



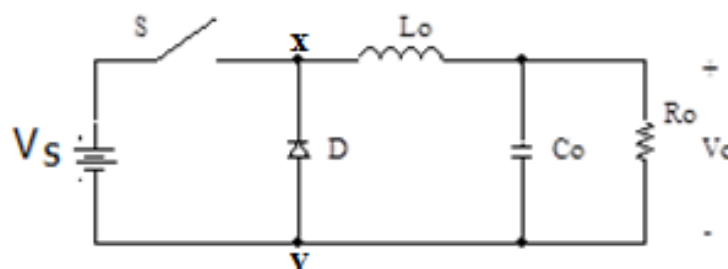
Fonte: Adaptado de Martins e Barbi. 2006

2.2. Conversor *Buck*

O conversor *Buck* ou *step-down* é um conversor abaixador de tensão, caracterizado por ter entrada em tensão e saída em corrente.

a) Diagrama elétrico do conversor *Buck*, figura 2.3 etapas de funcionamento e forma de onda V_{xy} , gráfico 2.4:

Figura 2.3
Conversor Buck



Fonte: Adaptado de Martins e Barbi. 2006

1ª Etapa ($0, DT$): S está conduzindo. A corrente circula por L_o e pela saída. Nesta etapa V_S fornece energia para a saída e para a magnetização da bobina L_o .

2ª Etapa ($DT, (1-D).T$): S está bloqueado. No instante de abertura de S o diodo D entra em condução. A energia da bobina é transferida para a carga, isto é, a bobina é desmagnetizada.

Gráfico 2.4

Tensão nos terminais do diodo.



Fonte: Adaptado de Erickson e Maksimovic, 2000

Como a tensão média sobre a bobina deve ser nula, tem-se:

$$V_o = V_{XY_med} = \frac{1}{T} \int_0^{DT} V_s dt \quad (6)$$

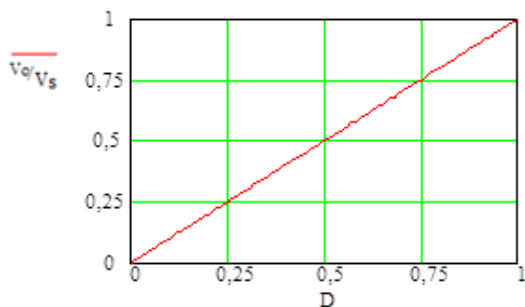
Pela equação 7 se obtém a razão cíclica:

$$D = \frac{V_o}{V_s} \quad (7)$$

O gráfico 2.5 mostra que a variação da tensão de saída em função da razão cíclica para o conversor *Buck* é linear.

Gráfico 2.5

Ganho estático em função da razão ciclica do conversor *Buck*.

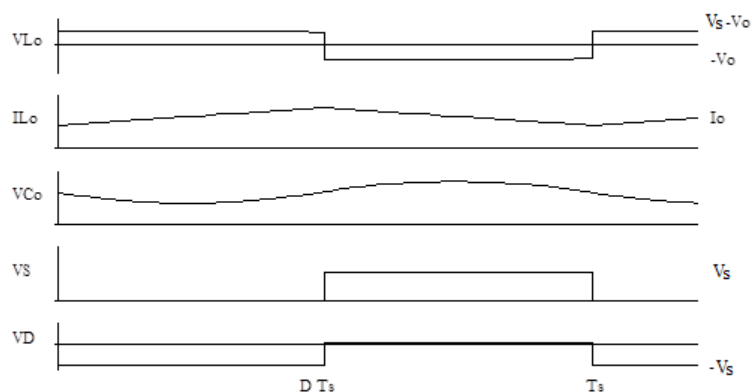


Fonte: Elaboração própria

b) O gráfico 2.6 mostra a evolução no tempo das formas de onda nos componentes do conversor *Buck*.

Gráfico 2.6

Formas de onda sobre os componentes do conversor *Buck*



Fonte: Adaptado de Martins e Barbi. 2006

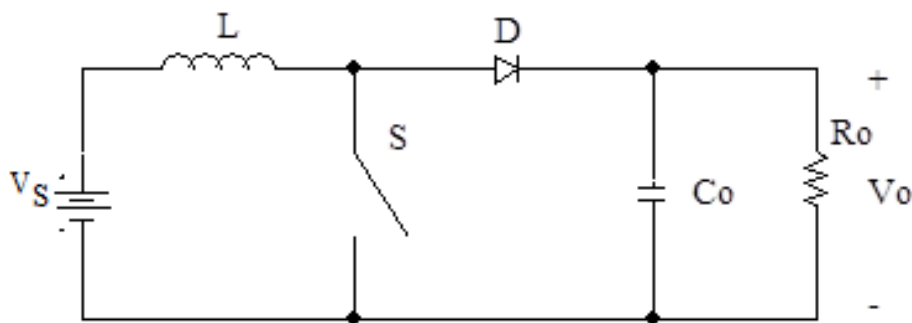
2.3. Conversor *Boost*

O conversor *Boost* é um conversor elevador de tensão, caracterizado por ter entrada em corrente e saída em tensão.

a) Diagrama elétrico do conversor *Boost*, figura 2.4, etapas de funcionamento e forma de onda nos terminais da bobina, gráfico 2.7:

Figura 2.4

Conversor *Boost*



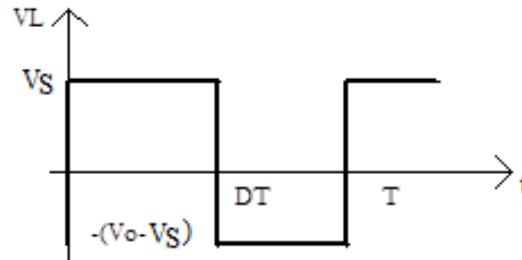
Fonte: Adaptado de Martins e Barbi. 2006

1ª Etapa (0, DT): S está conduzindo. A bobina L é magnetizada. A fonte V_S fornece energia à bobina.

2ª Etapa (DT, (1-D).T): S está bloqueado. O diodo D entra em condução. A fonte V_s e a bobina L fornecem energia à saída. A tensão na carga aumenta.

Gráfico 2.7

Tensão nos terminais da bobina.



Fonte: Adaptado de Erickson e Maksimovic, 2000

Como a tensão média sobre a bobina deve ser nula, tem-se:

$$\frac{1}{T} \int_0^{DT} V_s dt = \frac{1}{T} \int_0^{(1-D)T} (V_o - V_s) dt \quad (8)$$

$$\frac{V_o}{V_s} = \frac{1}{1-D} \quad (9)$$

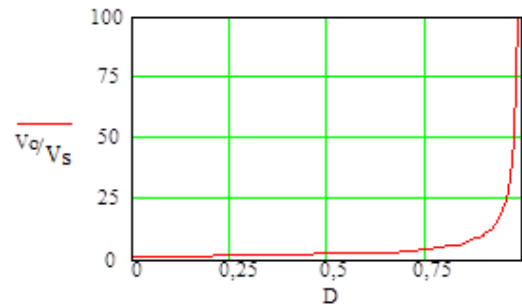
O ganho estático será calculado pela equação 10:

$$G = \frac{1}{1-D} \quad (10)$$

O gráfico 2.8 mostra que a variação da tensão de saída em função da razão cíclica para o conversor *Boost* é logarítmica. Para pequenas variações da razão cíclica, próxima da unidade, há um grande aumento da tensão média de saída.

Gráfico 2.8

Ganho estático em função da razão cíclica do conversor *Boost*.

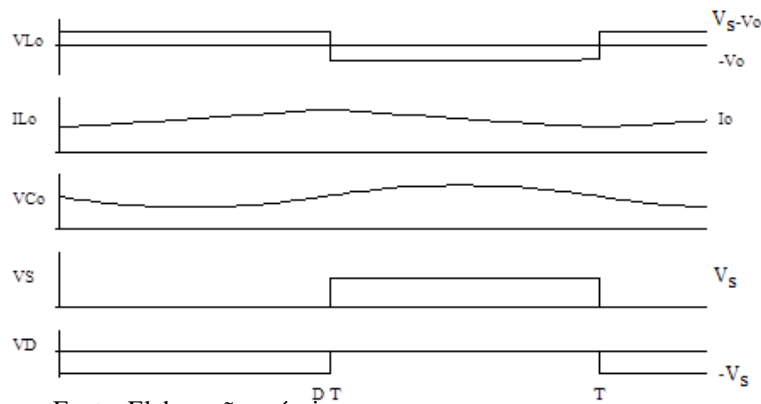


Fonte: Elaboração própria

- b) O gráfico 2.9 mostra as formas de onda nos componentes do conversor *Boost*.

Gráfico 2.9

Formas de onda nos componentes do conversor *Boost*.



Fonte: Elaboração própria

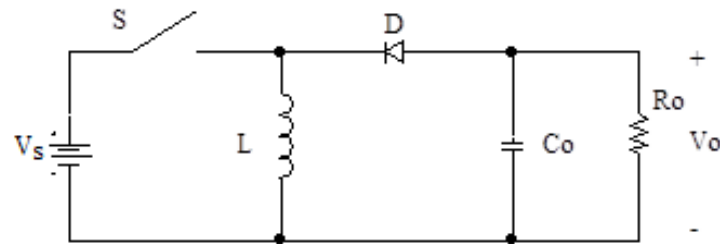
2.4. Conversor *Buck-Boost*

O conversor *Buck-Boost* é um conversor à acumulação de energia indutiva que pode operar como abaixador ou elevador, caracterizado por ter entrada em tensão e saída em tensão.

- a) Diagrama elétrico do conversor *Buck-Boost*, figura 2.5, etapas de funcionamento e forma de onda nos terminais da bobina, gráfico 2.10.

Figura 2.5

Diagrama eletrônico do conversor *Buck-Boost*



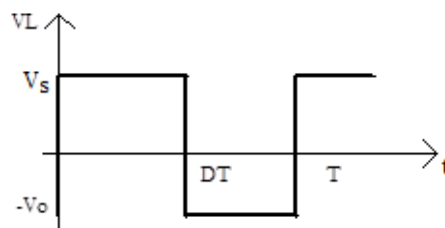
Fonte: Adaptado de Martins e Barbi, 2006

1ªEtapa (0, DT): S está conduzindo. A fonte V_s fornece energia para a magnetização da bobina L.

2ªEtapa (DT, (1-D) T): S está bloqueado. A energia da bobina L é transferida através do díodo D para a saída. A bobina L é desmagnetizada.

Gráfico 2.10

Tensão nos terminais da bobina.



Fonte: Adaptado de Erickson e Maksimovic, 2000

Como a tensão média entre os terminais da bobina deve ser nula, tem-se:

$$\frac{1}{T} \int_0^{DT} V_s dt = \frac{1}{T} \int_0^{(1-D)T} V_o dt \quad (11)$$

$$\frac{V_o}{V_s} = \frac{D}{1-D} \quad (12)$$

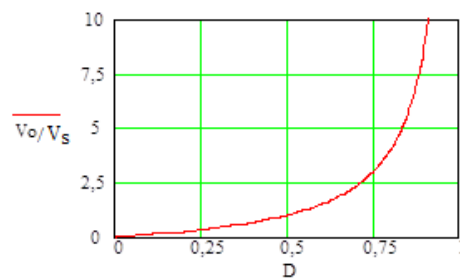
O ganho estático será calculado pela equação 13:

$$G = \frac{D}{1-D} \quad (13)$$

No gráfico 2.11 nota-se que a variação da tensão média de saída em função da razão cíclica para o conversor *Buck-Boost* não é linear.

Gráfico 2.11

Ganho estático em função da razão cíclica do conversor *Buck-Boost*

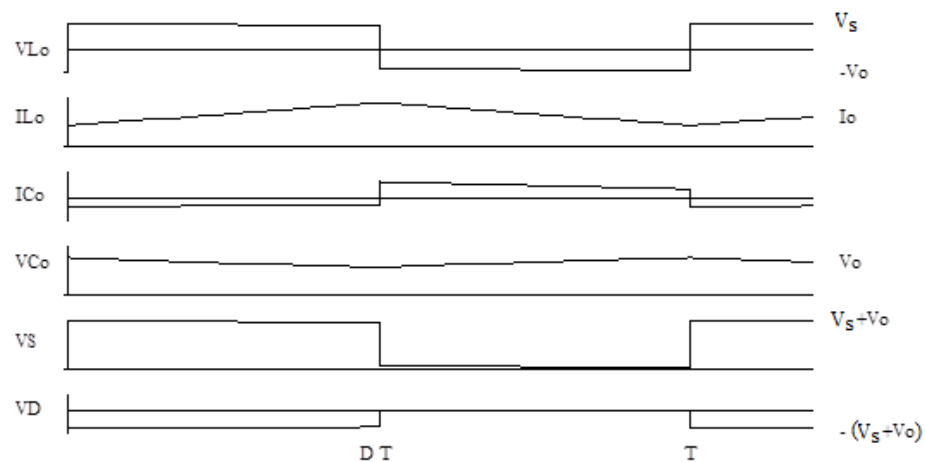


Fonte: Elaboração própria

b) No gráfico 2.12 mostra-se as formas de onda sobre os componentes do conversor *Buck-Boost*

Gráfico 2.12

Principais formas de onda do conversor Buck-Boost



Fonte: Elaboração própria

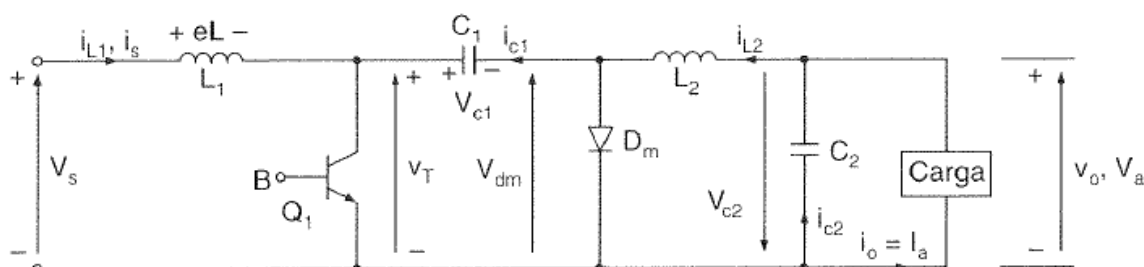
2.5. Conversor Cuk e a sua topologia clássica

O conversor *Cuk*, em homenagem ao seu inventor, *Slobodan Cuk*¹, faz parte do grupo de conversores de primeira geração e são chamados de conversores clássicos à acumulação de energia capacitiva que operam em um modo de único quadrante e na fixa de baixa potência, segundo Rashid (2001).

A figura 2.6 mostra o diagrama eletrónico do conversor *Cuk* com uma chave de potência, o TBJ (transístor bipolar de junção). Opera como um *boost-buck*, o conversor *Cuk* fornece uma tensão de saída que é menor ou maior que a tensão de entrada, mas a polaridade da tensão de saída está invertida em relação à tensão de entrada. Quando a tensão de entrada é ligada e o transístor Q_1 desligado, o díodo D_m é diretamente polarizado e o condensador C_1 é carregado através de L_1 , D_m e da alimentação da entrada V_s .

Figura 2.6

Diagrama elétrico do conversor Cuk



Fonte: Rashid.1993

2.5.1. Funcionamento do conversor *Cuk*

O funcionamento do circuito eletrónico do conversor *Cuk* baseia-se em duas etapas. Uma quando o transístor de comutação está desligado, conforme mostra o circuito equivalente da figura 2.7 e outra quando o transístor de comutação está ligado conforme mostra o circuito equivalente da figura 2.8.

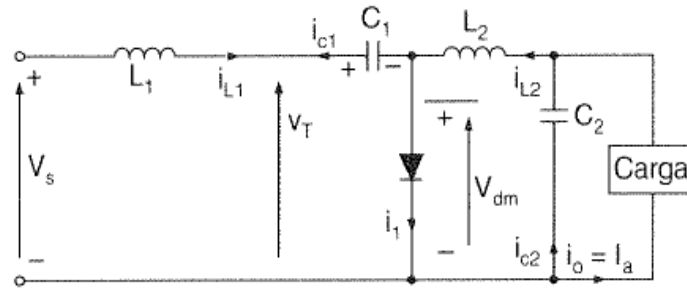
Quando o transístor de comutação Q_1 está desligado em $t=t_1$. O condensador C_1 é carregado a partir da fonte de alimentação de entrada V_s e a energia armazenada na bobina

¹ Slobodan Cuk é um inventor jugoslavo, naturalizado americano, autor, empresário, engenheiro elétrico e ex-professor no *California Institute of technology*.

L_2 é transferida para a carga. O diodo D_m e o transistor Q_1 fornecem uma ação de chaveamento síncrona. O condensador C_1 é o meio de transferência de energia da fonte de tensão de entrada para a carga.

Figura 2.7

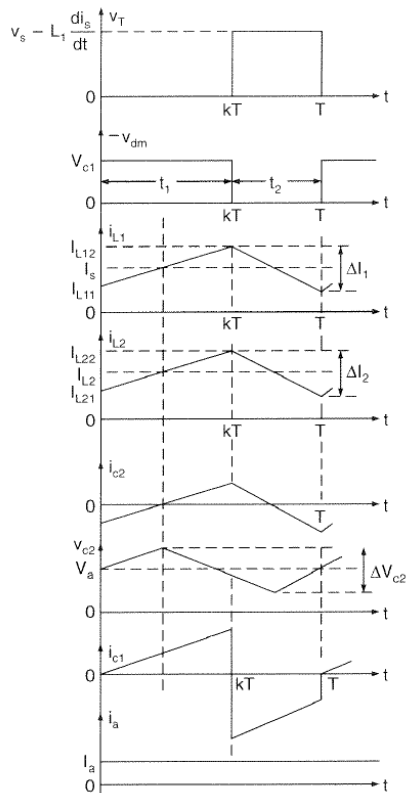
Circuito equivalente com Q_1 desligado



Fonte: Rashid.1993

Gráfico 2.13

Evolução das formas de onda sobre os componentes do conversor Cuk

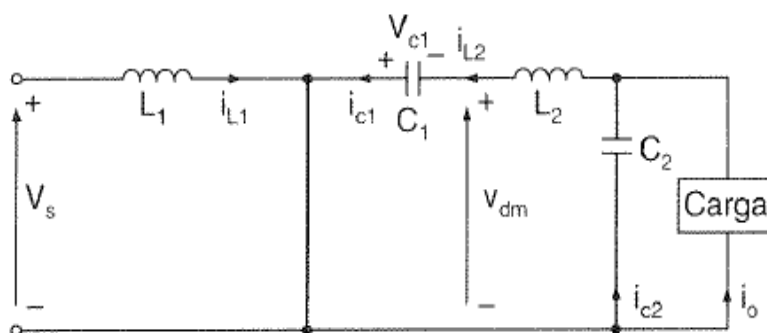


Fonte: Rashid.1993

Quando o transístor de comutação Q_1 está ligado em $t=0$. A corrente através L_1 aumenta. Ao mesmo tempo, a tensão no condensador C_1 polariza inversamente o díodo D_m e o desliga. O condensador C_1 descarrega sua energia armazenada sobre o circuito formado pelo condensador C_1 , o condensador C_2 , a carga e a bobina L_2 .

Figura 2.8

Circuito equivalente com Q_1 ligado



Fonte: Rashid.1993

De acordo com Rashid (1993) o princípio de funcionamento do regulador *Cuk* consiste na transferência de energia do condensador. Como o resultado, a corrente de entrada é contínua. O circuito tem baixas perdas de chaveamento e eficiência elevada. Quando o transístor Q_1 está conduzindo, ele suporta as correntes das bobinas L_1 e L_2 . Consequentemente, um pico de corrente flui através do transístor Q_1 . Como o condensador C_1 possibilita a transferência de energia, a ondulação de corrente também é elevada. Esse circuito também requer condensador e bobina adicionais.

2.5.2. Comportamento da tensão e corrente nos componentes do conversor *Cuk*

A fundamentação teórica do princípio de funcionamento do circuito eletrónico do conversor *Cuk* está ancorada numa análise matemática que considera os componentes do circuito ideais. A análise matemática que se segue está apoiada em Erickson e Maksimovic, 2000.

Aplicando a lei de *Kirchhoff* das tensões na figura 2.8, tem-se:

Malha 1

$$V_{L1} = V_S \quad (14)$$

Malha 2

$$V_{L2} = V_{C1} - V_{C2} \quad (15)$$

Malha 3

$$V_{C2} = V_0 \quad (16)$$

Pela lei de *Kirchhoff* das correntes na figura 2.8, tem-se:

$$I_{C1} = -I_{L2} \quad (17)$$

$$I_0 = \frac{V_0}{R_0} \quad (18)$$

$$I_{L2} = I_{C2} + I_0 \quad (19)$$

Aplicando a lei de *Kirchhoff* das tensões na figura 2.7, tem-se:

Malha 1

$$V_{L1} = V_S - V_{C1} \quad (20)$$

Malha 2

$$V_{L2} = -V_{C2} \quad (21)$$

Malha 3

$$V_{C2} = V_0 \quad (22)$$

Aplicando a lei de *Kirchhoff* das correntes na figura 2.7, tem-se:

$$I_{C1} = I_{L1} \quad (23)$$

$$I_0 = \frac{V_o}{R_o} \quad (24)$$

$$I_{L2} = I_{C2} + I_o \quad (25)$$

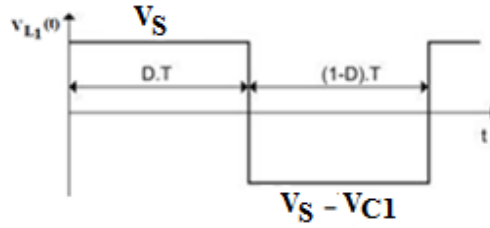
$$I_{C2} = I_{L2} - \frac{V_o}{R_o} \quad (26)$$

2.5.3. Ganho Estático (G) do conversor *Cuk*

O ganho estático determina-se com a análise gráfica da tensão e corrente elétrica nos componentes passivos (bobinas e condensadores) do circuito elétrico do conversor *Cuk*.

Gráfico 2.14

Tensão elétrica nos terminais da bobina de entrada.



Fonte: Adaptado de Erickson e Maksimovic, 2000.

Da análise do gráfico 2.14, tem-se:

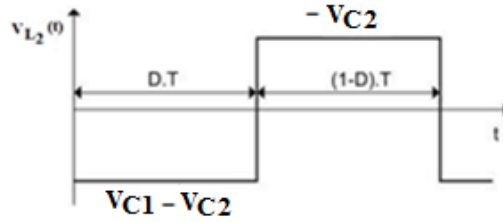
$$D \times V_S + (1 - D) \times (V_S - V_{C1}) = 0 \quad (27)$$

Isolando V_{C1} da equação 27, tem-se:

$$V_{C1} = \frac{V_S}{(1 - D)} \quad (28)$$

Gráfico 2.15

Tensão elétrica entre os terminais da bobina de saída



Fonte: Adaptado de Erickson e Maksimovic, 2000

Da análise do gráfico 2.15, tem-se:

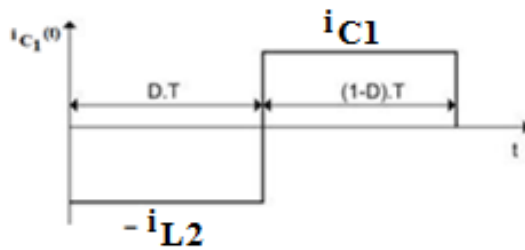
$$D \times (V_{C2} - V_{C1}) - (1 - D) \times V_{C2} = 0 \quad (29)$$

Isolando V_{C2} da equação 29 tem-se:

$$V_{C2} = \frac{D}{(1 - D)} \times V_S \quad (30)$$

Gráfico 2.16

Corrente elétrica no condensador C_1



Fonte: Adaptado de Erickson e Maksimovic, 2000

Da análise do gráfico 16, tem-se:

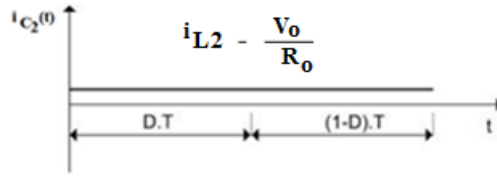
$$-D \times I_{L2} + (1 - D) \times I_{L1} = 0 \quad (31)$$

Isolando I_{L1} da equação 31, tem-se:

$$I_{L1} = -\left(\frac{D}{(1-D)}\right)^2 \times \frac{V_s}{R_o} \quad (32)$$

Gráfico 2.17

Corrente elétrica no condensador saída C_2



Fonte: Adaptado de Erickson e Maksimovic, 2000

Da análise do gráfico 2.17, tem-se:

$$(D + (1-D))\left(I_{L2} - \frac{V_{C2}}{R_o}\right) = 0 \quad (33)$$

Isolando I_{L2} da equação 33, tem-se:

$$I_{L2} = \frac{D}{(1-D)} \times \frac{V_s}{R_o} \quad (34)$$

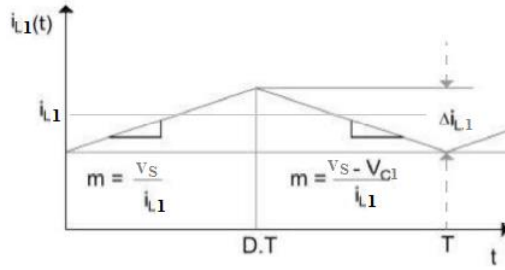
Sabendo que $V_o = V_{C2}$ e substituído a equação 28 em $G = \frac{V_{C2}}{V_s}$, obtém-se o ganho estático do conversor *Cuk*, pela equação 35:

$$G = \frac{D}{1-D} \quad (35)$$

2.5.4. Ondulação da corrente I_{L1} , I_{L2} e da tensão V_{C1} ,

Gráfico 2.18

Ondulação da corrente elétrica na bobina de entrada



Fonte: Adaptado de Erickson e Maksimovic, 2000

Comutador Q_1 em corte (circuito aberto):

$$\frac{di_{L1}(t)}{dt} = \frac{V_{L1}(t)}{L_1} = \frac{V_S - V_{C1}}{L_1} \quad (36)$$

$$\frac{di_{2}(t)}{dt} = \frac{V_{L2}(t)}{L_2} = \frac{V_{C2}}{2} \quad (37)$$

$$\frac{dV_{C1}(t)}{dt} = \frac{i_{C1}(t)}{C_1} = \frac{i_{L1}}{C_2} \quad (38)$$

Comutador Q_1 em saturação (curto-circuito):

$$\frac{di_{L1}(t)}{dt} = \frac{V_{L1}(t)}{L_1} = \frac{V_S}{L_1} \quad (39)$$

$$\frac{di_{2}(t)}{dt} = \frac{V_{L2}(t)}{L_2} = \frac{V_C - V_{C2}}{L_2} \quad (40)$$

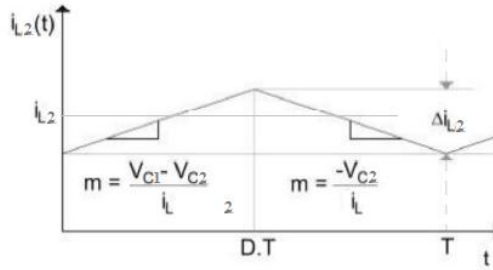
$$\frac{dV_{C(t)}}{dt} = \frac{i_{C(t)}}{C} = \frac{i_o}{C} \quad (41)$$

Calculando ΔI_{L1} usando a expressão geral da reta do gráfico 2.18, tem-se:

$$(i_{L1} + \Delta i_{L1}) - (i_{L1} - \Delta i_{L1}) = \left(\frac{V_S}{L_1}\right) \times (D \times T - 0) \quad (42)$$

Gráfico 2.19

Ondulação da corrente elétrica na bobina de saída



Fonte: Adaptado de Erickson e Maksimovic, 2000

Calculando ΔI_{L2} usando a expressão geral da reta do gráfico 2.19, tem-se:

$$(i_{L1} + \Delta i_{L1}) - (i_{L1} - \Delta i_{L1}) = \left(\frac{V_S}{L_1}\right) \times (D \times T - 0) \quad (43)$$

$$(i_{L2} + \Delta i_{L2}) - (i_{L2} - \Delta i_{L2}) = \left(\frac{V_S - V_{C2}}{L_2}\right) \times (D \times T - 0) \quad (44)$$

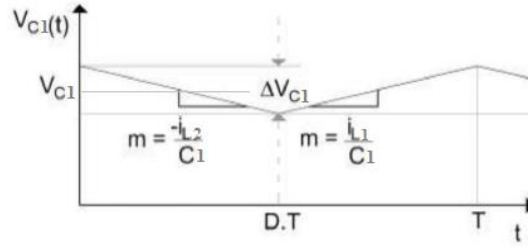
$$\Delta i_{L2} = \frac{(V_{C1} - V_{C2}) \times D \times T}{2L_2} \quad (45)$$

Substituindo V_{C1} e V_{C2} pelas suas equações 28 e 30 respetivamente, tem-se:

$$\Delta i_{L2} = \frac{V_S \times D \times T}{2L_2} \quad (46)$$

Gráfico 2.20

Ondulação da tensão elétrica nos terminais do condensador C_1



Fonte: Adaptado de Erickson e Maksimovic, 2000

Calculando ΔV_C usando a expressão geral da reta do gráfico 2.20, tem-se:

$$(V_C + \Delta V_C) - (V_C + \Delta V_C) = \left(\frac{-i_o}{C} \right) \times (0 - D \times T)$$

$$2\Delta V_C = \left(\frac{-i_o}{C} \right) (-D \times T)$$

$$2\Delta V_C = \frac{i_o}{C} \times D \times T \quad (47)$$

Substituindo I_o (equação 34) em 47 e isolando ΔV_C , tem-se:

$$2\Delta V_C = \frac{\left(\frac{D}{(1-D)} \times \frac{V_S}{R_o} \right)}{C} \times D \times T$$

$$\Delta V_C = \frac{V_S \times D^2 \times T}{2 \times C \times R_o \times (1-D)} \quad (48)$$

3. CONVERSOR CC-CC DE DUPLO GANHO ESTÁTICO

A escolha da topologia clássica do conversor *Cuk* deve-se das vantagens que apresenta, principalmente pelo facto de ter à entrada e à saída tipo fonte de corrente, ideal para as cargas que exigem uma corrente constante.

Na figura 3.1, mostra-se o conversor cc-cc de duplo ganho estático desenvolvido a partir da topologia clássica do conversor *Cuk*. Segundo a nomenclatura dos componentes do diagrama eletrónico tem-se: tensão de entrada V_s proveniente de uma fonte renovável de energia, L_1 bobina de entrada em série com V_s formam uma fonte de corrente de entrada para carregar o condensador de acúmulo de energia C_1 , responsável pela transferência de energia da entrada para a saída V_o .

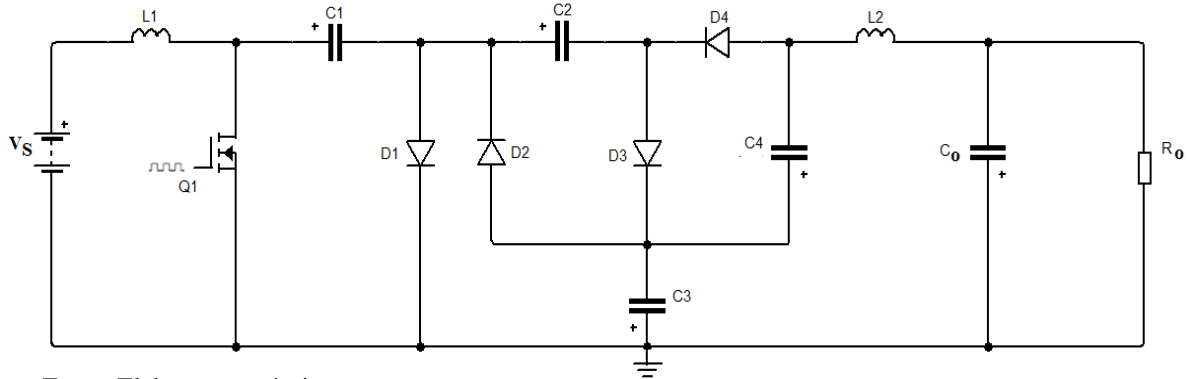
Q_1 é o transistor MOSFET de comutação com modulação por largura de pulso (PWM) responsável pelo controlo do conversor. C_2 , C_3 , C_4 , D_2 , D_3 e D_4 formam a célula multiplicadora de tensão que funciona como uma fonte de tensão para a saída e que em série com a bobina de saída L_2 formam uma fonte de corrente para a carga. D_1 diodo de comutação que permite a transferência de energia armazenada em L_2 para a carga quando há corte de Q_1 , enquanto C_o faz parte do filtro passa baixa de saída com L_2 e R_o representa a carga do conversor.

Para a análise do conversor considerou-se duas etapas de funcionamento, MOSFET em saturação e em corte, acompanhado de algumas especificações:

- O conversor opera em modo de condução contínua;
- Todos os semicondutores são de comutação rápida e ideais;
- Todos os componentes passivos são ideais;
- A tensão elétrica média nas bobinas é nula;
- A corrente elétrica média nos condensadores é nula.

Figura 3.1

Diagrama eletrônico do conversor cc-cc proposto



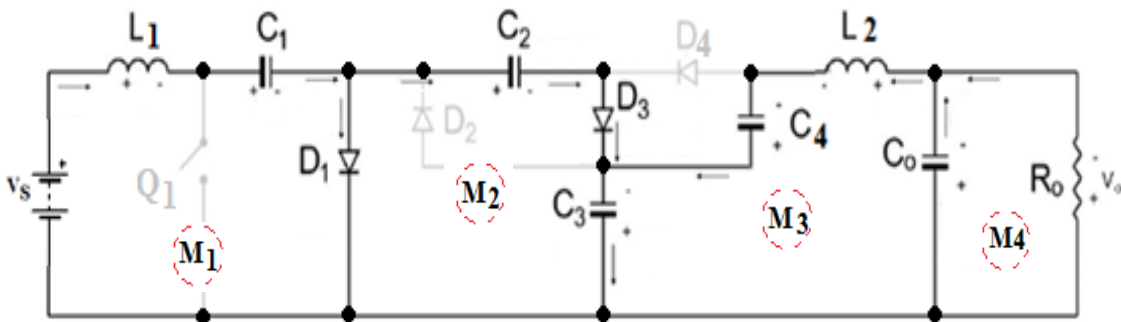
Fonte: Elaboração própria

3.1. 1ª Etapa de Operação do Conversor cc-cc de Duplo Ganho Estático

Na figura 10 mostra-se o diagrama eletrônico da primeira etapa com o comutador Q_1 desligado (corte), circuito aberto.

Figura 3.2

Diagrama eletrônico da primeira etapa de operação



Fonte: Elaboração própria

Os díodos de comutação rápida D_1 e D_3 encontram-se à condução (curto-circuitos entre os seus terminais) por um curto período de tempo, C_3 e C_2 em paralelo, por sua vez em série com o condensador C_4 , ocorrendo a auto elevação de tensão do estágio do *boost* (momento de ocorrência do duplo ganho estático). Por outro lado, os díodos de comutação

rápida D₂ e D₄ encontram-se a corte. Ainda, durante este intervalo de tempo, a bobina L₁ transfere energia para o condensador C₁, enquanto, o condensador C₃ faz a transferência de energia para o condensador C₂ e o condensador C₄ previamente carregado, atua como fonte de tensão para a carga.

3.1.1. Corrente elétrica nos componentes do circuito eletrônico

Aplicando a lei de *Kirchhoff* das correntes, tem-se:

$$I_S = i_{L1} = i_{C1} \quad (49)$$

$$i_{C2} = i_{D3} \quad (50)$$

$$i_{D3} = i_{C3} - i_{L2} \quad (51)$$

$$-i_{C4} = -i_{L2} \quad (52)$$

$$i_{D1} = i_{L1} - i_{C3} + i_{L2} \quad (53)$$

3.1.2. Tensão elétrica nos componentes do circuito eletrônico

Aplicando a lei de *Kirchhoff* das tensões, tem-se:

Malha 1

$$V_{L1} = V_S - V_{C1} \quad (54)$$

Malha 2

$$V_{C3} = V_{C2} \quad (55)$$

Malha 3

$$V_{L2} = V_{C4} + V_{C3} - V_{CO} \quad (56)$$

Malha 4

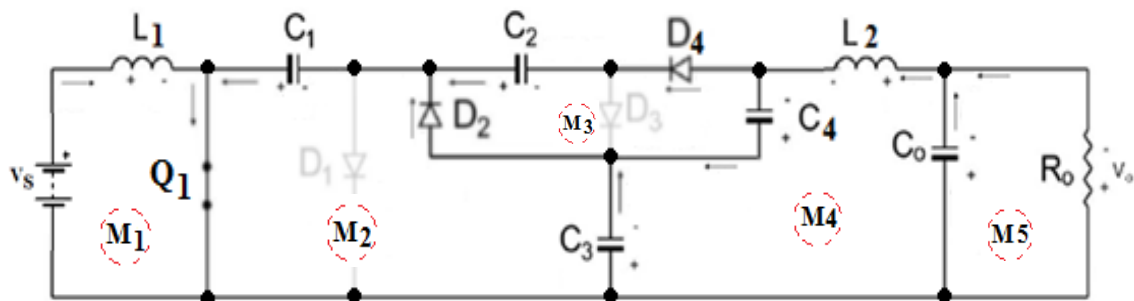
$$V_{co} = V_o \quad (57)$$

3.2. 2ª Etapa de Operação do Conversor cc-cc de Duplo Ganho Estático

Na figura 3.3 mostra-se o diagrama elétrico da segunda etapa de funcionamento, o semicondutor de comando encontra-se à condução (Q_1 em saturação), curto-circuitos entre os seus terminais.

Figura 3.3

Diagrama elétrico da segunda etapa



Fonte: Elaboração própria

Neste intervalo de tempo, a fonte de tensão contínua V_s energiza a bobina L_1 . Os díodos de comutação rápida D_1 e D_3 encontram-se polarizados inversamente (circuito aberto entre os seus terminais). Por outro lado, os díodos D_2 e D_4 encontram-se à condução (curto-circuitos entre os seus terminais), ficando os condensadores C_1 e C_3 em paralelo (onde ocorrerá, transferência de energia de C_1 para C_3) e este grupo em série com os condensadores C_2 e C_4 em paralelo e previamente carregados, mantendo-se estável a tensão elétrica nos terminais da carga (momento de ocorrência do duplo ganho estático). Entretanto, a bobina L_2 e a carga receberam a energia proveniente do condensador C_1 , que descarrega-se, causando um acréscimo na corrente i_{L2} .

3.2.1. Corrente elétrica nos componentes do circuito eletrônico

Aplicando a lei de *Kirchhoff* das correntes, tem-se:

$$I_S = i_{L1} \quad (58)$$

$$i_{C2} = i_{D4} \quad (59)$$

$$i_{C3} = i_{D2} \quad (60)$$

$$i_{C1} = i_{L2} + i_{C3} \quad (61)$$

$$i_{Q1} = i_{L1} + i_{C3} + i_{L2} \quad (62)$$

3.2.2. Tensão elétrica nos componentes do circuito elétrico

Aplicando a lei de *Kirchhoff* das tensões, tem-se:

Malha 1

$$V_{L1} = V_S \quad (63)$$

Malha 2

$$V_{C1} = V_{C3} \quad (64)$$

Malha 3

$$V_{C2} = V_{C4} \quad (65)$$

Malha 4

$$V_{L2} = V_{C4} + V_{C3} - V_{C0} \quad (66)$$

Malha 5

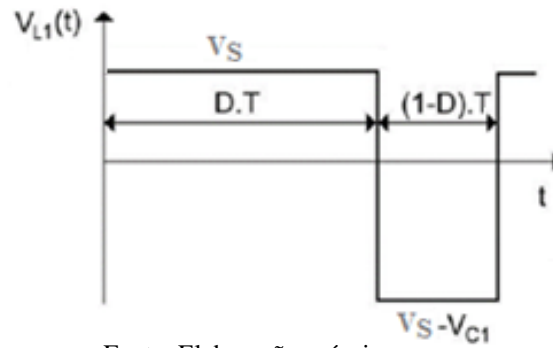
$$V_{C0} = V_o \quad (67)$$

3.3. Ganho Estático do Conversor cc-cc de Duplo Ganho Estático

Nos gráficos 3.1 e 3.2 mostram-se as formas de onda da tensão elétrica entre os terminais das bobinas de entrada e de saída (L_1 e L_2 respetivamente) do conversor proposto. A partir destes determina-se o ganho estático em função da razão cíclica (D).

Gráfico 3.1

Forma de onda da tensão elétrica nos terminais da bobina de entrada L_1



Fonte: Elaboração própria

Da análise do gráfico 3.1, extrai-se V_{C1} :

$$(DT) \times V_S + [(1-D) \times T] \times (V_S - V_{C1}) = 0$$

$$T \times V_S - T \times V_{C1} + TDV_{C1} = 0$$

$$V_s - V_{C1} + DV_{C1} = 0$$

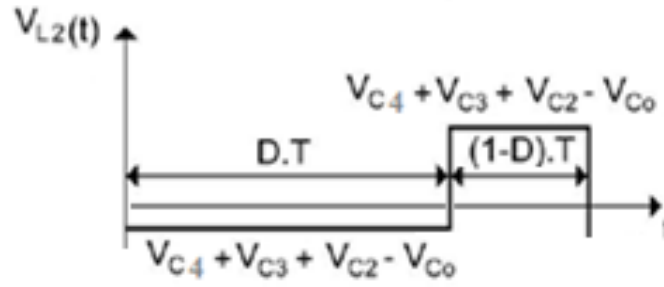
$$V_s - V_{C1}(1 - D) = 0$$

$$V_{C1} = V_s \left(\frac{1}{1 - D} \right) \quad (68)$$

Equação referente a bobina L_1

Gráfico 3.2

Forma de onda da tensão elétrica nos terminais da bobina de saída



Fonte: Elaboração própria

Do gráfico 3.2, extrai-se V_{CO} .

$$(DT) \times (V_{C4} + V_{C3} - V_{CO}) + [(1 - D) \times T] \times (V_{C4} + V_{C3} - V_{CO}) = 0$$

$$TV_{C4} + TV_{C3} - TV_{CO} = 0 \quad (69)$$

$$V_{CO} = V_{C4} + V_{C3}$$

Sendo que $V_{C3} = V_{C2}$ e $V_{C4} = V_{C2}$, substituído na equação, tem-se:

$$V_{CO} = V_{C2} + V_{C2}$$

$$V_{CO} = 2V_{C2} \quad (70)$$

$$V_{C2} = \frac{V_{CO}}{2}$$

Ainda sabe-se que $V_{C1} = V_{C3}$ e $V_{C2} = V_3$, então, $V_{C1} = V_{C2}$, tem-se, $V_{C1} = \frac{V_{CO}}{2}$, referente a L_2 . Como a tensão elétrica no condensador de transferência de energia C_1 nas duas etapas é a mesma, então, iguala-se as equações de V_{C1} referente a L_2 e L_1 , tem-se:

$$\frac{V_{CO}}{2} = \frac{V_s}{(1-D)}$$

$$\frac{V_{CO}}{V_s} = \frac{2}{(1-D)}$$

Sendo $G = \frac{V_{CO}}{V_s}$, substituindo, tem-se:

$$G = 2 \times \left(\frac{1}{1-D} \right) \quad (71)$$

A equação 71 traduz-se no DUPLO GANHO ESTÁTICO do conversor proposto, que é duas vezes a do conversor *Boost*, ou seja, apresenta maior ganho de tensão de entre os conversores cc-cc não isolados.

Tabela 1
Conversores cc-cc básicos não isolados

Conversor	Ganho Estático
Buck	D
Boost	$\frac{1}{(1-D)}$
Buck-Boost	$\frac{D}{(1-D)}$
Cuk	$\frac{D}{(1-D)}$
Sepic	$\frac{D}{(1-D)}$
Zeta ²	$\frac{D}{(1-D)}$
Novo	
J.A	$2 \times \left(\frac{1}{(1-D)} \right)$

Fonte: Elaboração própria

² Os conversores Sepic e Zeta não foram abordados no trabalho

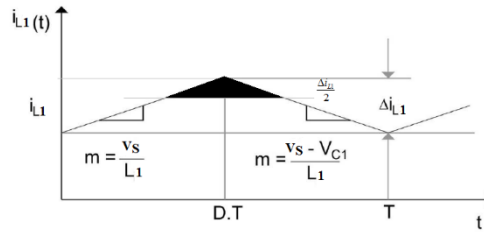
3.4. Ondulação nos componentes do conversor cc-cc proposto

A ondulação nos componentes passivos do conversor cc-cc deve-se do chaveamento do transístor de potência e determina-se pela análise dos dois momentos, corte e condução do transístor Q_1 .

3.4.1. Ondulação da corrente elétrica na bobina L_1

Gráfico 3.3

Ondulação da corrente elétrica na bobina de entrada L_1



Fonte: Elaboração própria

Com o comutador de potência Q_1 em condução, tem-se:

$$\frac{di_{L1}(t)}{dt} = \frac{V_{L1}(t)}{L_1} = \frac{V_S}{L_1} \quad (72)$$

Com o comutador de potência Q_1 em corte, tem-se:

$$\frac{di_{L1}(t)}{dt} = \frac{V_{L1}(t)}{L_1} = \frac{V_S - V_{C1}}{L_1} \quad (73)$$

Da equação geral da reta do gráfico 19, extrai-se Δi_{L1} :

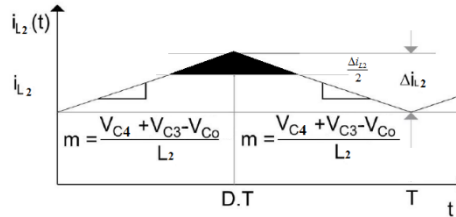
$$\left(i_{L1} + \frac{\Delta i_{L1}}{2}\right) - \left(i_{L1} - \frac{\Delta i_{L1}}{2}\right) = \left(\frac{V_S}{L_1}\right) \times (D \times T - 0)$$

$$\Delta i_{L1} = \frac{V_S \times D \times T}{L_1} \quad (74)$$

3.4.2. Ondulação da corrente elétrica na bobina L_2

Gráfico 3.4

Ondulação da corrente elétrica na bobina de entrada L_2



Com o comutador de potência Q_1 em condução, tem-se:

$$\frac{di_{L2}(t)}{dt} = \frac{V_{L2}(t)}{L_2} = \frac{V_{C4} + V_{C3} - V_{CO}}{L_2} \quad (75)$$

Com o comutador de potência Q_1 em corte, tem-se:

$$\frac{di_{L2}(t)}{dt} = \frac{V_{L2}(t)}{L_2} = \frac{V_{C4} + V_{C3} - V_{CO}}{L_2} \quad (76)$$

Da equação geral da reta do gráfico 20, extrai-se Δi_{L2} :

$$(i_{L2} + \frac{\Delta i_{L2}}{2}) - (i_{L2} - \frac{\Delta i_{L2}}{2}) = \left(\frac{V_{C4} + V_{C3} - V_{CO}}{L_2} \right) \times (D \times T - 0) \quad (77)$$

$$\Delta i_{L2} = \frac{(V_{C4} + V_{C3} - V_{CO}) \times D \times T}{L_2} \quad (78)$$

Sendo $V_{CO} = V_{C4} + V_{C3}$, substituindo na equação, tem-se:

$$\Delta i_{L2} = 0 \quad (79)$$

3.4.3. Ondulação de tensão elétrica no condensador C₁

Com o transistor de comutação Q₁ em corte, a fonte de corrente de entrada, formada pela fonte de tensão de entrada V_S em série com o bobina de entrada L₁, transfere carga elétrica para o condensador de transferência de energia C₁, durante intervalo [0, (1-D).T], a ondulação pico a pico é dada pela equação 80:

$$\Delta V_{C1} = \frac{1}{C_1} \int_0^{(1-D)T} i_{C1} \times dt \quad (80)$$

Como o condensador C₁ está em série com a fonte de tensão V_S, a corrente média de armazenamento de energia i_{C1} no condensador C₁ é igual I_S = i_{L1}, então:

$$\Delta V_{C1} = \frac{1}{C_1} \int_0^{(1-D)T} I_{L1} dt$$

$$\Delta V_{C1} = \frac{i_{Li} \times (1 - D) \cdot T}{C_1} \quad (81)$$

3.4.4. Ondulação de tensão elétrica nos condensadores C₂, C₃ e C₄

Com o transistor de comutação Q₁ em condução no intervalo (0, DT), os condensadores C₁ e C₃ ficam em paralelo, em série com a bobina L₂ e C₂//C₄. Os condensadores são percorridos pela mesma corrente média, então, tem-se:

$$i_{C2} = -i_{C3} = i_{L2} \quad (82)$$

Para, C₂ = C₃ = C₄ = C, tem-se:

$$\Delta V_{C2} = \Delta V_{C3} = \frac{1}{C} \int_0^{\frac{(1-D)T}{2}} i_{L1} \cdot dt \quad (83)$$

$$\Delta V_{C2} = \Delta V_{C3} = \Delta V_{C3} = \frac{i_{L2} \times (1 - D) \times T}{2C} \quad (84)$$

3.4.5. Ondulação de tensão elétrica no condensador Co

Considerando-se que a ondulação da corrente de carga Δi_0 não existe, tem-se:

$$\Delta i_{L2} = \Delta i_{CO} \quad (85)$$

Sendo $\Delta i_{L2} = 0$, tem-se:

$$\Delta V_{CO} = 0 \quad (86)$$

3.5. Corrente elétrica nos semicondutores de potência

3.5.1. Corrente elétrica média no comutador Q₁

Considera-se que o comutador Q₁ em saturação, conduz uma corrente elétrica média I_{Q1} no intervalo (0, DT), dado por:

$$I_{Q1} = i_{L1} + i_{L2} + i_{C3} \quad (87)$$

Desconsiderando as perdas do circuito elétrico, a potência de entrada iguala-se a potência de saída, $i_{L1} \times V_s = V_o \times i_o$, a corrente elétrica média em L₁, é:

$$i_{L1} = \frac{V_o}{V_s} \times i_o \quad (88)$$

Substituindo as equações do ganho estático $G = 2 \left(\frac{1}{1-D} \right)$ e $i_o = \frac{V_o}{R_o}$ na equação da corrente média do bobina L_1 , tem-se:

$$i_{Li} = \left(\frac{2}{1-D} \right) \times \frac{V_o}{R_o} \quad (89)$$

Obtendo-se i_{Li} em função de V_s , tem-se:

$$i_{Li} = \left(\frac{2}{1-D} \right)^2 \times \frac{V_s}{R_o} \quad (90)$$

Com a mesma igualdade, $i_{L1} \times V_s = V_o \times i_o$, Determina-se a corrente média em L_2 :

$$\left(\frac{2}{1-D} \right)^2 \times \frac{V_s}{R_o} \times V_s = V_o \times i_o \quad (91)$$

Sabe-se que a corrente média nos condensadores é nula, $i_{L2} = -i_o$, substituindo na equação 91, tem-se:

$$i_{L2} = - \left(\frac{2}{1-D} \right) \times \frac{V_s}{R_o} \quad (92)$$

Estando Q_1 em condução no intervalo $(0, DT)$, o condensador C_3 fica em paralelo com C_1 , então para a corrente elétrica média, tem-se:

$$i_{C3} = \frac{1}{T} \times \int_0^T i_{L2}(t) dt \quad (93)$$

A partir do gráfico 20 no intervalo (DT, T) , obtém-se:

$$i_{c3} = -\frac{1}{T} \times \int_0^{\frac{(1-D)T}{2}} \left(\frac{2}{1-D} \right) \times \frac{V_S}{R_0}(t) dt$$

$$i_{c3} = -\frac{V_S}{R_0} \quad (94)$$

Então a corrente média no comutador Q1 é:

$$I_{Q1} = \left(\frac{2}{1-D} \right)^2 \times \frac{V_S}{R_0} + \left(\frac{2}{1-D} \right) \times \frac{V_S}{R_0} - \frac{V_S}{R_0} \quad (95)$$

3.5.2. Corrente elétrica eficaz no comutador Q1

A corrente elétrica eficaz no comutador Q1 determina-se a partir da seguinte definição:

$$i_{Q1ef} = \sqrt{\frac{1}{T} \times \int_0^{D \times T} i_{Q1}(t)^2 dt} \quad (96)$$

$$i_{Q1ef} = i_{L1ef} + i_{L2ef} + i_{c3ef} \quad (97)$$

Calcula-se a corrente elétrica eficaz em L1, a partir da equação 100, no intervalo (0, DT):

$$i_{L1}(t) = \frac{V_S}{L_1} \cdot t + i_{L1} - \frac{\Delta i_{L1}}{2} \quad (98)$$

$$i_{L1}(t) = \left(\frac{V_S}{L_1} \times t + \left(\frac{2}{1-D} \right)^2 \times \frac{V_S}{R_0} - \frac{V_S \times D \times T}{2L_1} \right) \quad (99)$$

$$i_{L1ef} = \sqrt{\frac{1}{T} \times \int_0^{DT} \left(\frac{V_S}{L_1} \times t + \left(\frac{2}{1-D} \right)^2 \times \frac{V_S}{R_0} - \frac{V_S \times D \times T}{2L_1} \right)^2 dt} \quad (100)$$

Calcula-se a corrente elétrica eficaz em L₂, a partir da equação 101, no intervalo (0, DT):

$$i_{L2}(t) = \frac{V_{C4} + V_{C3} - V_{CO}}{L_2} \times t + i_{L2}$$

$$i_{L2}(t) = \frac{V_{C4} + V_{C3} - V_{CO}}{L_2} \times t - \left(\frac{2}{1-D} \right) \times \frac{V_S}{R_0}$$

$$i_{L2ef} = \sqrt{\frac{1}{T} \times \int_0^{DT} \left(- \left(\frac{2}{1-D} \right) \times \frac{V_S}{R_0} \right)^2 dt} \quad (101)$$

Em C₃, a partir da equação 102, no intervalo (0, (1-D) T/2)

$$i_{C3ef} = \sqrt{\frac{1}{T} \times \int_0^{\frac{(1-D)T}{2}} \left(- \left(\frac{1}{1-D} \right) \times \frac{V_S}{R_0} \right)^2 dt} \quad (102)$$

Então a corrente eficaz no comutador Q1 é:

$$i_{Q1ef} = \sqrt{\frac{1}{T} \times \int_0^{DT} \left(\frac{V_S}{L_1} \times t + \left(\frac{2}{1-D} \right)^2 \times \frac{V_S}{R_0} - \frac{V_S \times D \times T}{2L_1} \right)^2 dt} \quad (103)$$

$$+ \sqrt{\frac{1}{T} \times \int_0^{DT} \left(- \left(\frac{2}{1-D} \right) \times \frac{V_S}{R_0} \right)^2 dt} + \sqrt{\frac{1}{T} \times \int_0^{(1-D)T} \left(- \left(\frac{1}{1-D} \right) \times \frac{V_S}{R_0} \right)^2 dt}$$

3.5.3. Corrente média e de pico nos díodos de comutação rápida

$$i_D = \frac{1}{T} \int_0^T i_D(t) dt \quad (104)$$

Considerando Q₁ em saturação, D₂ e D₄ conduzem, tem-se:

$$i_{D2} = i_{L2} + i_{C3} - i_{C2} \quad (105)$$

$$i_{D2} = \frac{1}{T} \int_0^{\frac{T}{4}} \left[\left[-\left(\frac{2}{1-D} \right) \times \frac{V_s}{R_0} \right] - \frac{V_s}{R_0} - \left(\frac{1}{1-D} \right) \times \frac{V_s}{R_0} \right] dt \quad (106)$$

$$i_{D4} = i_{C2} \quad (107)$$

$$i_{D4} = -\frac{1}{T} \int_{DT}^T \left[\left(\frac{1}{1-D} \right) \times \frac{V_s}{R_0} \right] dt \quad (108)$$

Considerando Q₁ em corte, D₁ e D₃ conduzem, tem-se:

$$i_{D1} = i_{L1} + i_{L2} - i_{C3} \quad (109)$$

$$i_{D1} = \frac{1}{T} \int_{DT}^T \left[\left(\left(\frac{2}{1-D} \right)^2 \times \frac{V_s}{R_0} \right) + \left(-\left(\frac{2}{1-D} \right) \times \frac{V_s}{R_0} \right) + \frac{V_s}{R_0} \right] dt \quad (110)$$

$$i_{D3} = i_{C2} \quad (111)$$

$$i_{D3} = -\frac{1}{T} \int_{DT}^T \left[\left(\frac{1}{1-D} \right) \times \frac{V_s}{R_0} \right] dt \quad (112)$$

3.5.4. Corrente de pico nos díodos de comutação rápida

Dada a definição, tem-se:

$$i_{D1pk} = i_{Li} + \frac{\Delta i_{Li}}{2} + i_o + \frac{\Delta i_{L2}}{2} \quad (113)$$

Como $\Delta i_{L2} = 0$, tem-se:

$$i_{D1pk} = \left(\left(\frac{2}{1-D} \right)^2 \times \frac{V_s}{R_0} \right) + \frac{V_s \times D \times T}{2L_1} + \frac{2V_s}{(1-D).R_0} \quad (114)$$

Logo, tem-se:

$$i_{D1pk} = i_{D2pk} = i_{D3pk} = i_{D4pk} \quad (115)$$

4. PROJETO DO CONVERSOR CC-CC DE DUPLO GANHO ESTÁTICO

Neste capítulo apresenta-se o dimensionamento dos parâmetros e dos componentes do projeto, conversor CC-CC de Duplo Ganho Estático. O projeto baseou-se nas especificações apresentadas na tabela e considera-se o conversor operando em malha aberta.

Tabela 2
Especificações do projeto

Tensão de entrada cc	31,8V
Tensão saída cc	320V
Potência de saída	250W
Frequência de comutação	100KHz
Variação da corrente elétrica na bobina de entrada	10%
Variação da tensão nos condensadores	1%
Bobina de saída	$2 \times L_1$

Fonte: Elaboração própria

4.1. Parâmetros para projeto dos componentes

Ganho estático:

$$G = \frac{V_o}{V_s} = \frac{320}{31,8} = 10,063$$

$$G = 2 \left(\frac{1}{1-D} \right)$$

$$\frac{10,063}{2} = \frac{1}{1-D}$$

$$D = 0,8$$

Resistência do Conversor:

$$P_o = \frac{V_o^2}{R_o}$$

$$R_o = \frac{(320V)^2}{250W} = 409,6\Omega$$

Corrente média de saída:

$$P_o = V_o \times I_o$$

$$I_o = \frac{P_o}{V_o} = \frac{250W}{320V} = 0,78A = 780mA$$

Corrente média na bobina de saída:

$$i_{L2} = -\left(\frac{2}{1-D}\right) \times \frac{V_s}{R_o} = -0,78A$$

$$i_{L2} = \left(\frac{2}{1-0,8}\right) \times \frac{31,8V}{409,6\Omega} = 0,78A$$

Corrente média na bobina de entrada:

$$i_{L1} = \left(\frac{2}{1-D}\right)^2 \times \frac{V_s}{R_o}$$

$$i_{L1} = \left(\frac{2}{1-0,8}\right)^2 \times \frac{31,8V}{409,6\Omega} = 7,76A$$

L₁ para uma ondulação máxima de 10%, tem-se:

$$\Delta i_{L1} = 10\% \times 7,76A = 0,776A$$

$$L_1 = \frac{V_S \times D \times T}{\Delta i_{L1}} = \frac{31,8V \times 0,8 \times 10\mu s}{0,776A} = 328\mu H$$

Da análise matemática encontrou-se a variação de corrente em L₂ zero, atribuiu-se um valor para L₁ de 680μH.

Para a tensão média em Co, tem-se:

$$V_{Co} = \frac{2V_S}{1-D} = \frac{2 \times 31,8}{1-0,8} = 318V$$

Para a tensão média em C₂, tem-se:

$$V_{C2} = \frac{V_{Co}}{2} = \frac{318}{2} = 159V = V_{C4}$$

Para a tensão média em C₁, tem-se:

$$V_{C1} = \frac{V_S}{1-D} = \frac{31,8}{1-0,8} = 159V = V_{C3}$$

Considerando uma ondulação máxima de 1%, (1,59V) nos condensadores, encontra-se C₁:

$$\Delta V_{C1} = \frac{i_{L1} \times (1-D) \times T}{C_1}$$

$$C_1 = \frac{7.76A \times (1 - 0.8) \times 10\mu s}{1.59V}$$

$$C_1 = 9.76\mu F$$

Para o valor de C_2 , C_3 e C_4 , tem-se:

$$\Delta V_{C_2} = \Delta V_{C_3} = \Delta V_{C_4} = \frac{i_{L2} \times (1 - D) \times T}{2C}$$

$$C = \frac{0.776A \times (1 - 0.8) \times 10\mu s}{2 \times 1.59V}$$

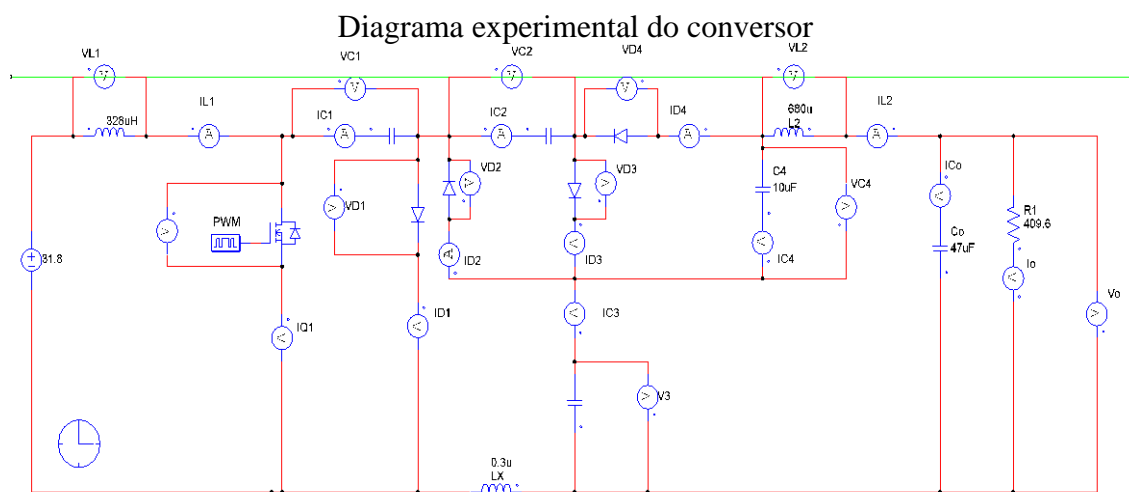
$$C = C_2 = C_3 = C_{14} = 0.49\mu F$$

Devido às características do circuito eletrônico de potência do conversor em estudo, adotou-se um valor comercial para os condensadores C_1 , C_2 , C_3 e C_4 de $10\mu F$ e $47\mu F$ para o condensador de saída C_O .

5. SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

Na figura 5.1 mostra-se o estágio de potência do conversor em estudo com os instrumentos de medida, devidamente inseridos no circuito, de modo a comprovar e avaliar os resultados obtidos durante a investigação da nova topologia no simulador de conversores estáticos *PSIM (Powersimu ln)*, a partir da evolução do sinal elétrico mostrado nas formas de onda de cada componente. Os gráficos que se seguem mostram os resultados obtidos durante a simulação.

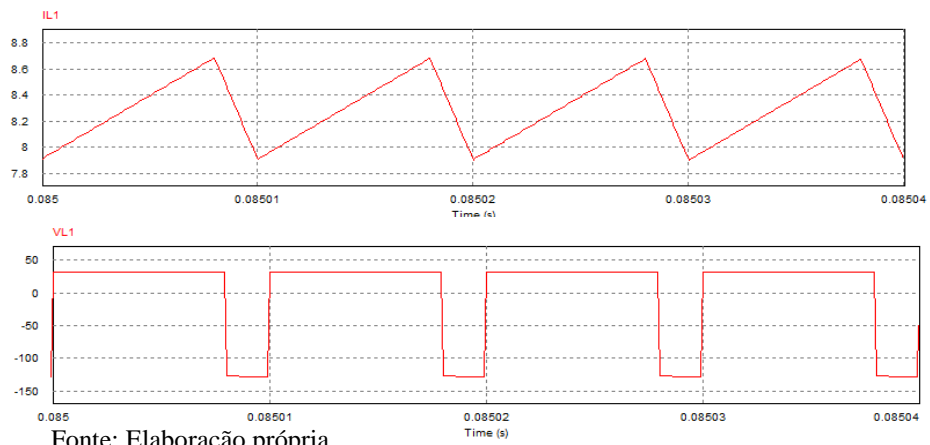
Figura 5.1



Fonte: Elaboração própria

Gráfico 5.1

Tensão e corrente em regime permanente na bobina de entrada L_1



Do gráfico 5.1, tem-se:

$$\Delta i_{L1} = 0,821A$$

Gráfico 5.2

Tensão e corrente em regime permanente no comutador Q_1

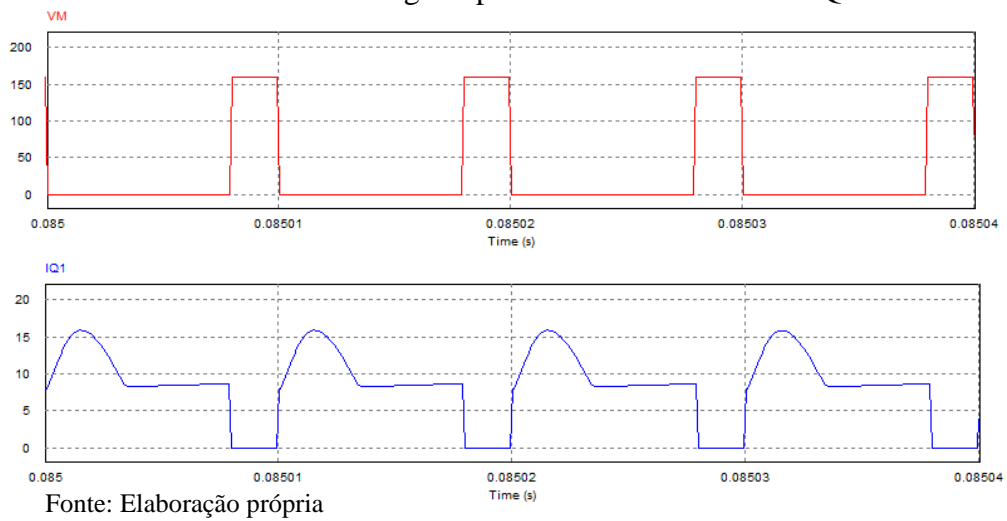
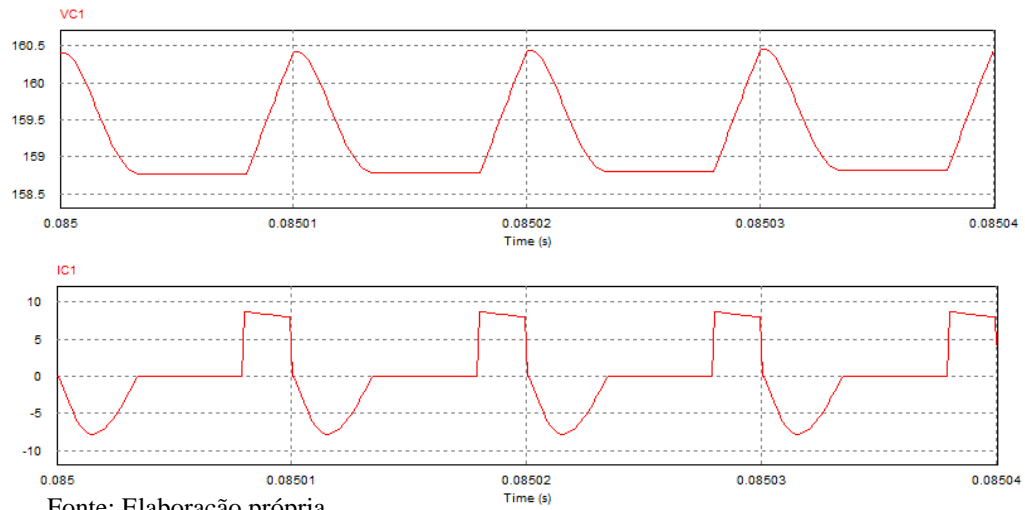


Gráfico 5.3

Tensão e corrente em regime permanente no condensador C₁



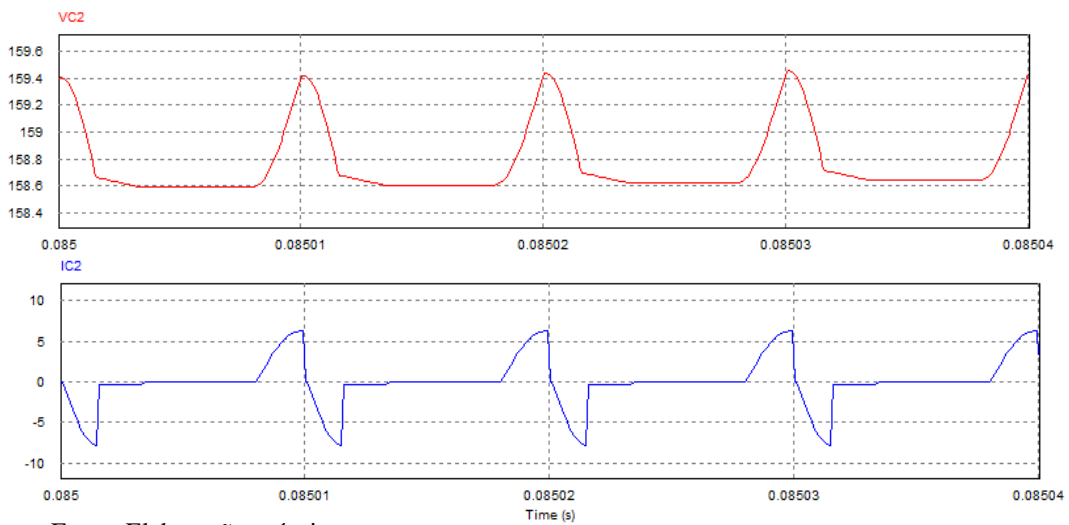
Fonte: Elaboração própria

Do gráfico 5.3, tem-se:

$$\Delta V_{C1} = 1,5956V$$

Gráfico 5.4

Tensão e corrente em regime permanente no condensador C₂



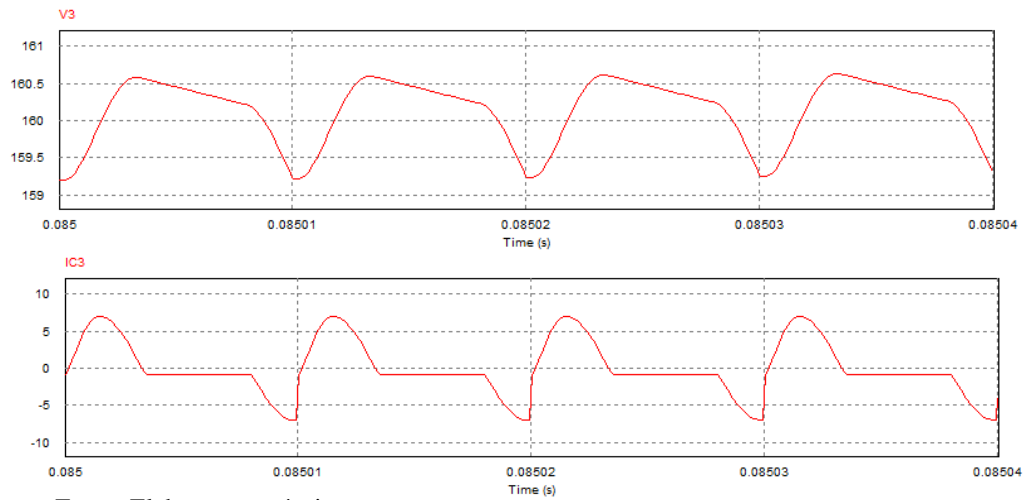
Fonte: Elaboração própria

Do gráfico 5.4, tem-se:

$$\Delta V_{C2} = 1,59V$$

Gráfico 5.5

Tensão e corrente em regime permanente no condensador C₃



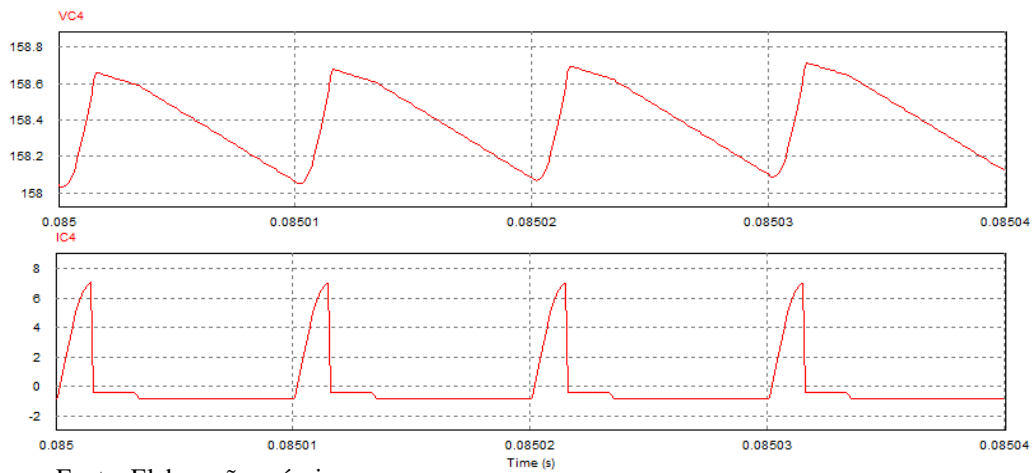
Fonte: Elaboração própria

Do gráfico 5.5, tem-se:

$$\Delta V_{C3} = 1,59937V$$

Gráfico 5.6

Tensão e corrente em regime permanente no condensador C₄



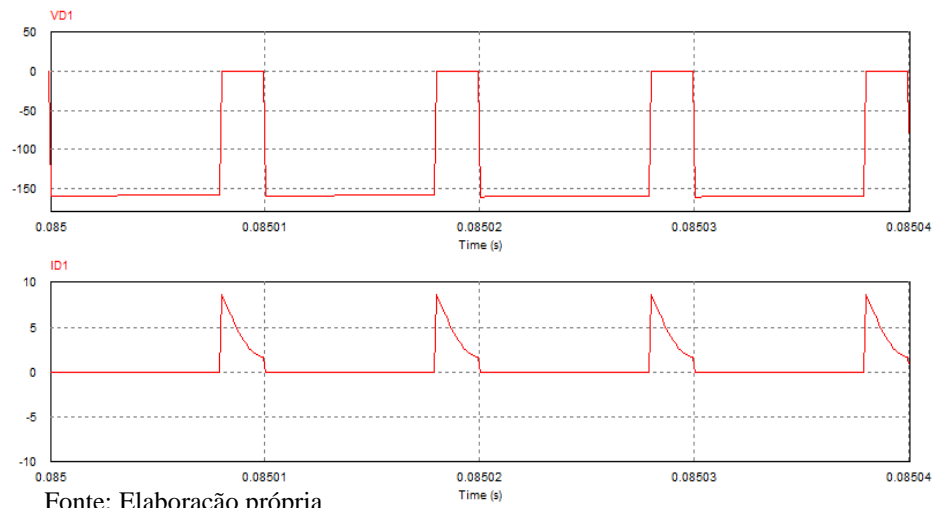
Fonte: Elaboração própria

Do gráfico 5.6, tem-se:

$$\Delta V_{C4} = 1,5833V$$

Gráfico 5.7

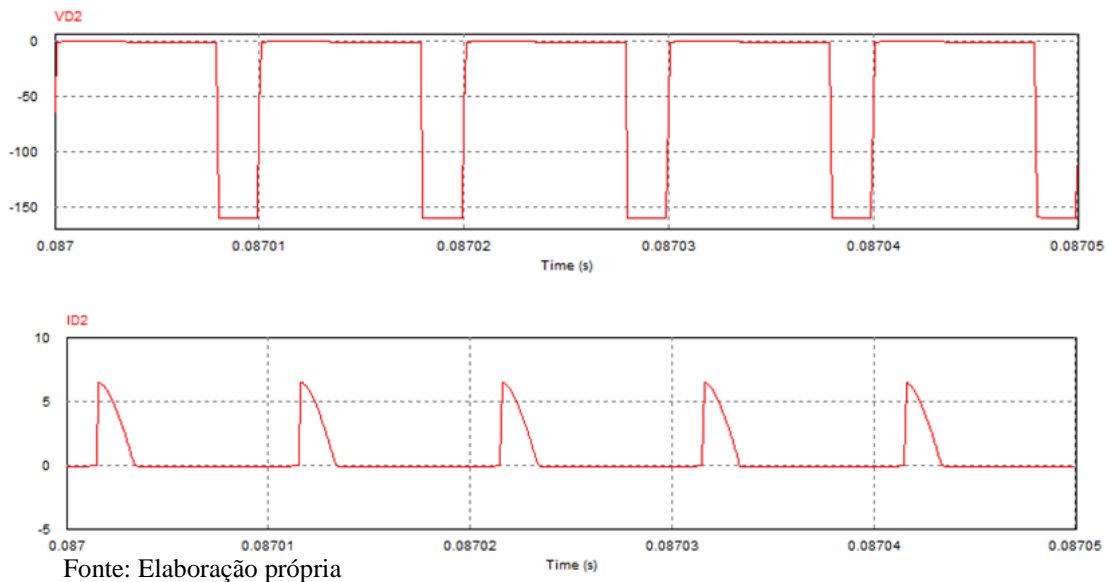
Tensão e corrente em regime permanente no diodo D_1



Fonte: Elaboração própria

Gráfico 5.8

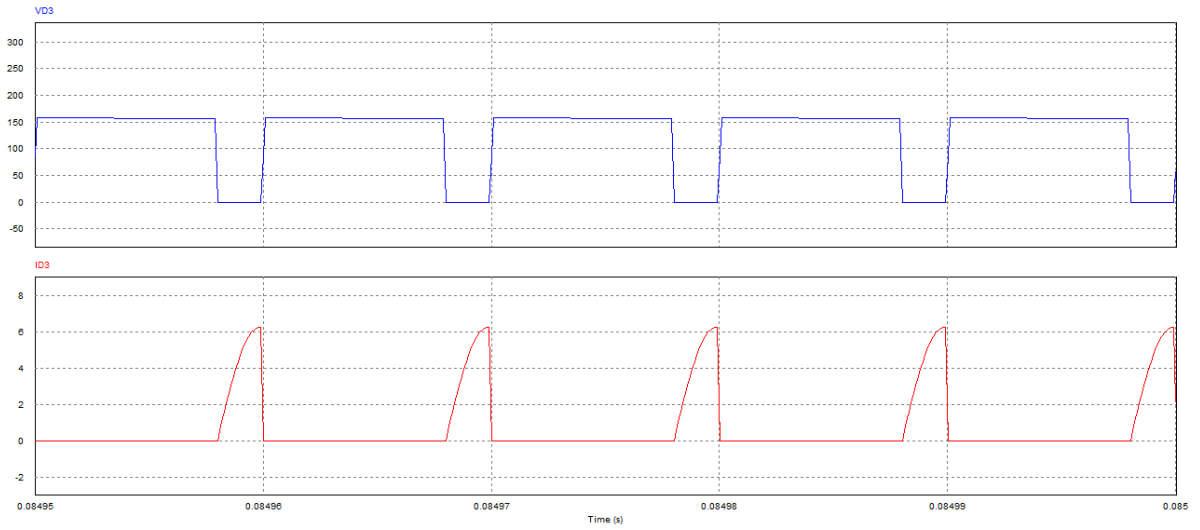
Tensão e corrente em regime permanente no diodo D_2



Fonte: Elaboração própria

Gráfico 5.9

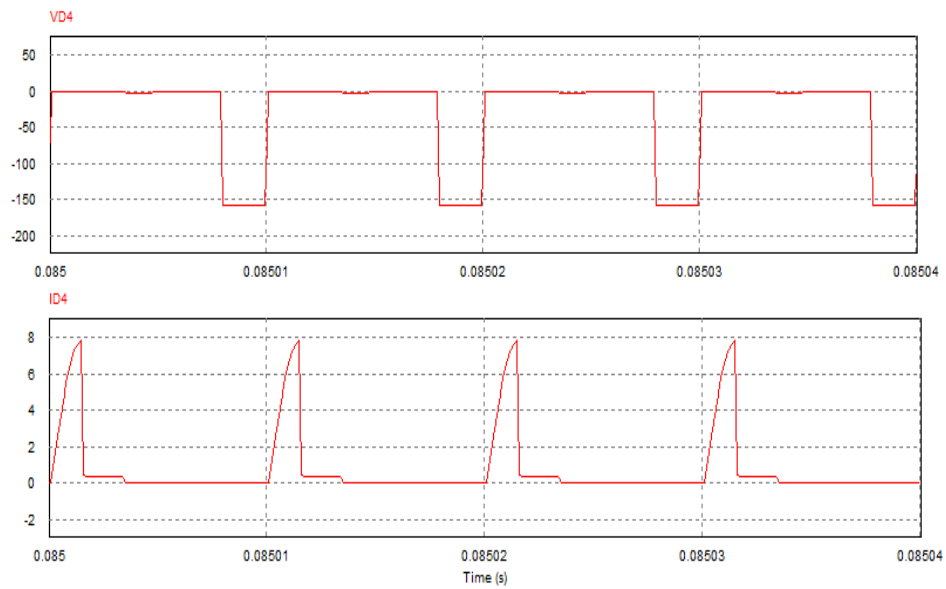
Tensão e corrente em regime permanente no diodo D_3



Fonte: Elaboração própria

Gráfico 5.10

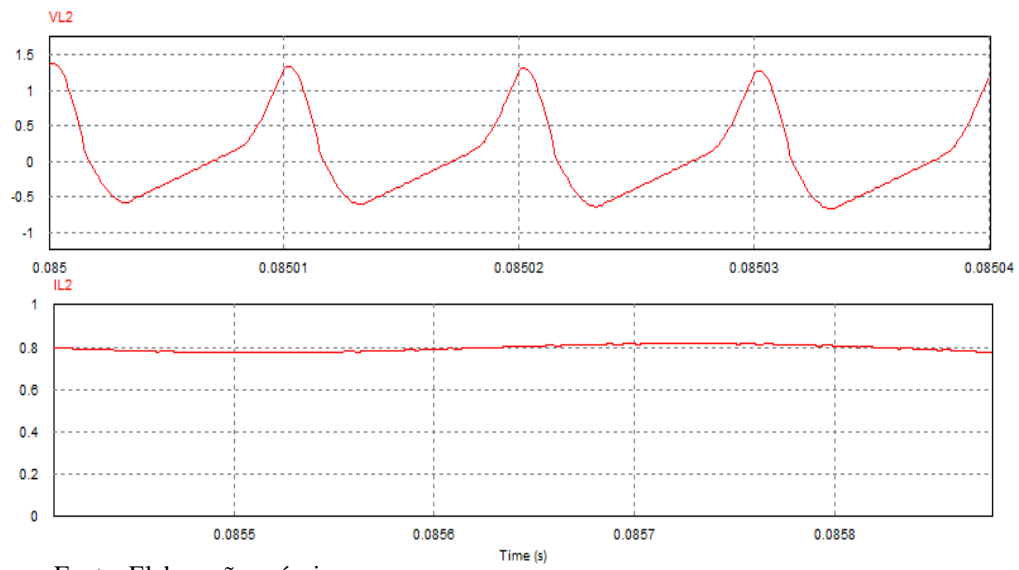
Tensão e corrente em regime permanente no diodo D_4



Fonte: Elaboração própria

Gráfico 5.11

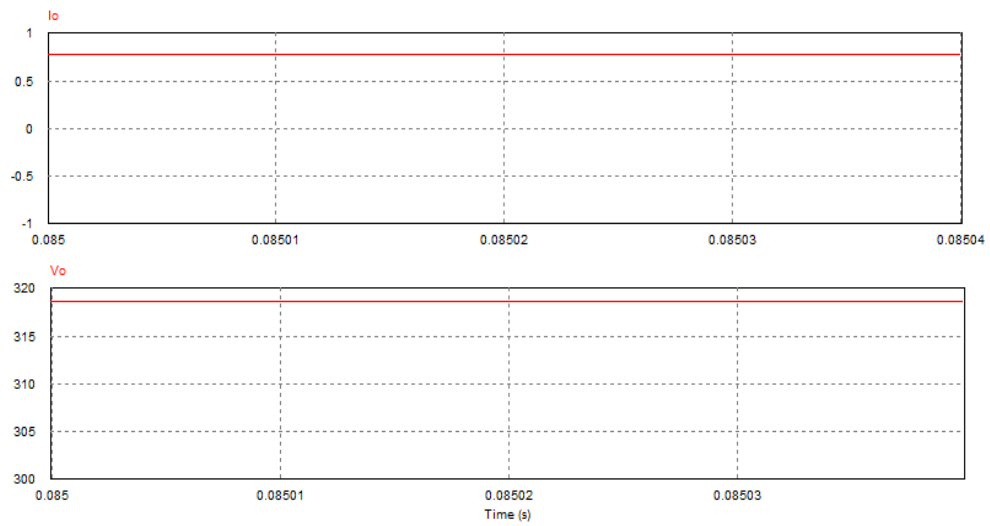
Tensão e corrente em regime permanente bobina de saída L_2



Fonte: Elaboração própria

Gráfico 5.12

Tensão e corrente em regime permanente na carga R_0



Fonte: Elaboração própria

6. ANALÍSE DOS RESULTADOS

Com os resultados obtidos durante a simulação, confirma-se o estudo realizado sobre o funcionamento da nova topologia, alcançando, desta forma, todos os propósitos do projeto. Diminuiu-se os esforços elétricos nos componentes eletrônicos e aumentou-se a eficiência do conversor aliado a um alto ganho estático em tensão.

A partir da análise da corrente e tensão elétrica (gráficos 24, 26, 27, 28 e 29) nos componentes passivos (bobinas e condensadores) do circuito eletrônico do conversor proposto, apresentam-se valores médios (159V) e ondulação de 1% (1,59V) para os quais foram dimensionados.

No MOSFET, gráfico 25, apesar de se apresentar um valor transitório devido ao condensador C_1 no intervalo $(0,DT)$ confirma-se o esforço elétrico esperado da análise teórica, não comprometendo o funcionamento do circuito.

Quanto aos díodos de comutação rápida os gráficos apresentam o resultado esperado e os valores máximos correspondem aos valores aproximados dos teóricos devido às aproximações realizadas.

Para o bobina L_2 e a carga do conversor R_O , os gráficos confirmam aquilo que se obteve na análise matemática, ondulação aproximadamente zero, gráficos 34 e 35, e que a corrente na carga será sempre contante (característica fonte de corrente) e a tensão de saída em 318V, confirmando o elevado ganho desta nova topologia.

Tabela 3

Comparação entre os conversores cc-cc não isolados

<i>Buck Converter</i>	<i>Boost Converter</i>	<i>Buck-Boost Converter</i>	<i>Cuk Converter</i>	<i>J.A converter</i>
A tensão de saída é sempre menor que a tensão de entrada	A tensão de saída é sempre maior que a tensão de entrada	A tensão de saída pode ser maior ou menor que a tensão de entrada	A tensão de saída pode ser maior ou menor que a tensão de entrada	A tensão de saída é sempre maior que a tensão de entrada
As tensões têm a mesma polaridade	As tensões têm a mesma polaridade	As tensões têm polaridade inversa	As tensões têm polaridade inversa	As tensões têm polaridade inversa
Pode ser utilizado como um transformador abaixador em corrente contínua	Pode ser utilizado como um transformador elevador em corrente contínua	Pode ser utilizado como um transformador elevador ou abaixador em corrente contínua	Pode ser utilizado como um transformador elevador ou abaixador em corrente contínua	Pode ser utilizado como um transformador elevador em corrente contínua

Fonte: Elaboração própria

7. CONCLUSÃO

Realizou-se este trabalho, com o objetivo de desenvolver uma nova topologia de Conversor contínuo para contínuo *Boost-Boost*, aplicado aos sistemas de produção de energia (fotovoltaico, eólico, célula de combustível ou bateria), tendo como foco aquisição do conhecimento científico na área da eletrônica de potência aplicada às energias renováveis.

Obteve-se com o estudo da nova topologia, um resultado interessante, em que o ganho estático encontrado é duas vezes o ganho estático de um conversor *Boost*, traduzindo-se num elevador de tensão, em que no mínimo, a tensão de saída será sempre o dobro da tensão que estiver presente na sua entrada.

Durante a simulação no *PSIM*., verificou-se um nível de tensão entre os terminais do comutador de potência da nova topologia menor que a tensão de saída, permitindo assim a escolha de um MOSFET com uma resistência interna baixa, o que faz aumentar o rendimento do conversor numa implementação prática.

Estes resultados confirmaram as hipóteses definidas sobre o funcionamento da nova topologia, alcançando, desta forma, todos os objetivos do projeto, pois diminuiu-se os esforços elétricos nos componentes eletrônicos e aumentou-se a eficiência do conversor aliado a um alto ganho estático em tensão.

Com a comprovação da veracidade dos resultados, decidiu-se batizar a nova topologia de *J.A converter (Boost-Boost)*, com duplo ganho estático, entrada e saída em corrente, alto rendimento e baixíssima ondulação, ideal para o condicionamento do sinal elétrico na geração de energia elétrica a partir de fontes de energias renováveis nos sistemas híbridos de micro geração.

8. TRABALHOS FUTUROS

Pelos resultados alcançados neste trabalho propõe-se a implementação de um sistema de controlo para regular o sistema de chaveamento e a tensão de saída para qualquer tipo de carga ligada ao inversor. Ainda a implementação do protótipo de uma placa de circuito impresso para investigação de melhorias.

9. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

- Barbi, I., 2006. *Electrônica de Potência*. 6ª ed. Florianópolis: Edição do autor.
- Barbi, I., s.d. *Projetos de fontes chaveadas*. 1º ed. Florianópolis: Edição do autor.
- Carmo, H. & Ferreira, M. M., 1998. *Metodologia de investigação. Guia para autoaprendizagem*. 1ª ed. Lisboa: Universidade Aberta.
- Carmo, H. & M.M., 1998. *Metodologia de investigação. Guia para autoaprendizagem*. 1º ed. Lisboa: Universidade Aberta.
- Erickson, R. W. & Maksimović, D., 2000. *Fundamentals of Power Electronics*. 2º ed. Colorado: Kluwer Academic Publishers.
- Labrique, F. & Santana, J. J. E., s.d. *Electrônica de Potência*. 1º ed. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian.
- Luo, F. L. & Ye, H., 2004. *Advanced DC/DC Converters*. 1ª ed. Florida: CRC Press LLC.
- Martins, D. C. & Barbi, I., 2006. *Conversores CC-CC Básicos não Isolados*. 2º ed. Florianópolis: Edição do autor.
- Paul, B., 2014. *Industrial Electronics and Control including Programmable logic Controller*. 3º ed. Calcutá: West Bengal Technical Education.
- Pressman, A. I., Bilings, K. & Morey, T., 2009. *Switching Power Supply Design*. 3º ed. United States: McGraw-Hill Companies.
- Rashid, M. H., 1993. *Eletrônica de Potência, Circuitos, Dispositivos e Aplicações*. California: Prentice-Hall, Inc..
- Rashid, M. H., 1999. *Eletrônica de Potência- Circuitos, Dispositivos e Aplicações*. São Paulo: Brasil Editora Ltda..
- Rashid, M. H., 2001. *Power Electronics Handbook*. 1ª ed. San Diego: Academic Press.
- Rashid, M. H., 2001. *Power Electronics Handbook*. Florida: Academic Press.
- Verde, D. G. d. E. C., 2015. *Plano Nacional de Ação para Eficiência Energética*, Cabo Verde: Cabo Verde.